# ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Lic. Agustín Rela



Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

# ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Lic. Agustín Rela

## a u t o r i d a d e s



Ministerio de Educación.
Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
Saavedra 789. C1229ACE.
Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
República Argentina.
2010

# ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

Lic. Agustín Rela



Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

Colección "Las Ciencias Naturales y la Matemática".
Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum
Coordinadora general de la Colección: Haydeé Noceti.



Industria Argentina

ISBN 978-950-00-0751-1

**Director de la Colección:**
Lic. Juan Manuel Kirschenbaum
**Coordinadora general y académica de la Colección:**
Prof. Ing. Haydeé Noceti
**Diseño didáctico y corrección de estilo:**
Lic. María Inés Narvaja
Ing. Alejandra Santos
**Coordinación y producción gráfica:**
Tomás Ahumada
**Diseño gráfico:**
María Victoria Bardini
**Ilustraciones:**
Diego Gonzalo Ferreyro
Federico Timerman
**Retoques fotográficos:**
Roberto Sobrado
**Diseño de tapa:**
Tomás Ahumada
**Administración:**
Cristina Caratozzolo
Néstor Hergenrether
**Colaboración:**
Téc. Op. en Psic. Soc. Cecilia L. Vazquez
Dra. Stella Maris Quiroga

Nuestro agradecimiento al personal del Centro Nacional de Educación Tecnológica por su colaboración.

Rela, Agustín
Electricidad y electrónica / Agustín Rela; dirigido por Juan Manuel Kirschenbaum.
- 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2010.
285 p.: il.; 24x19 cm. (Las ciencias naturales y la matemática / Juan Manuel Kirschenbaum.)

ISBN 978-950-00-0751-1

1. Electricidad.
2. Electrónica.
3. Enseñanza Secundaria.
I. Título

CDD 621.307 12

Fecha de catalogación: 19/01/2010

Impreso en Anselmo L. Morvillo S. A., Av. Francisco Pienovi 317 (B1868DRG), Avellaneda, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

Tirada de esta edición: 100.000 ejemplares



*Lic. Agustín Rela*

***El Autor***

Agustín Rela es electrotécnico y Licenciado en Física. Se desempeñó como docente en escuelas secundarias. Es autor de libros para estudiantes y docentes. Ha publicado numerosos artículos en revistas especializadas y ha presentado ponencias en congresos sobre temas referidos a la tecnología y a su enseñanza. Se desempeñó durante más de veinte años como profesor de física de la Universidad de Buenos Aires. Actualmente se desempeña como docente en el Instituto Municipal de Educación Superior de Formación Docente. Es asesor en el área de investigación y desarrollo en establecimientos industriales en temas referidos a aisladores de alta tensión. Codirige la revista Q. e. d. de divulgación de la física y la matemática para el Ciclo Básico Común de la Universidad de Buenos Aires.

# ÍNDICE

## Electricidad

# Electrónica

# Fundamentos de la electrostática



● **PINTADO ELECTROSTÁTICO.** Las gotitas de pintura, cargadas eléctricamente por una pistola conectada a diez mil volt, se adhieren al objeto por delante y por atrás, sin que se dispersen en el ambiente. Los filtros de carbón activado protegen la respiración del pintor de los solventes volátiles.

# Fundamentos de la electrostática (cargas en reposo)

## ■ Historia, cargas, polaridad

*Electra* es un personaje de antiguas obras famosas de teatro que tratan sobre el adulterio y terribles casos de asesinato y venganza. Ese nombre de mujer, en griego, significa rubia, ambarina o del color del ámbar. El ámbar es resina de pinos u otras plantas fosilizada y endurecida durante milenios, que se usaba en perfumería y para fabricar peines y adornos. El propio ámbar, en griego, se llama *electrón*; y las palabras "elegido" y "selecto" se relacionan, en ese idioma, con lo notable y brillante.



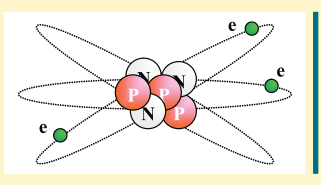
Eurípides (480-406 a.C.), autor de una de las tragedias de Electra.

Desde muy antiguo, quizá, desde antes de la escritura, se notó que cuando se frota con un paño o contra el cabello un objeto de ámbar, saltan chispas que se ven en la oscuridad y se oyen; y el objeto levanta plumas, pelusas y otros cuerpos livianos. Se observó también que en algunos casos los objetos frotados se atraen y en otros se rechazan. Esos efectos se llamaron ambarinos, o eléctricos.

Si un cuerpo atrae a otros dos, estos se repelen. Si rechaza a otros dos, estos también se repelen. Y si un cuerpo atrae a otro y rechaza un tercero, estos dos últimos cuerpos se atraen.

De eso se dedujo que hay dos clases de electricidad, primitivamente llamadas *ambarina* y *vítrea*, la del ámbar y la del vidrio. Después se las llamó polaridades negativa y positiva, respectivamente.

Hoy, 24 siglos después, explicamos esos efectos por la estructura atómica de la materia que sabemos compuesta por átomos, a su vez, formados por protones positivos, electrones negativos y neutrones neutros.




**El átomo de litio tiene tres protones, tres neutrones y tres electrones.**

Normalmente la cantidad de protones iguala la de electrones, por eso, la materia es neutra de ordinario. Sin embargo, cuando se ponen en contacto dos cuerpos y después se los separa, algunos de los electrones que pertenecían a un cuerpo pueden quedar en el otro, y así, el primero resulta con un exceso de protones (y de carga positiva), mientras el otro queda cargado negativamente.

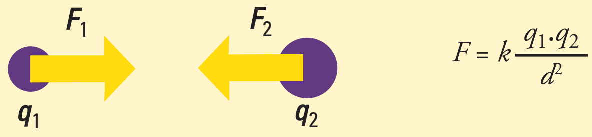


Fisionito, personaje de *Los Simpson*. El átomo de litio es el que más aparece en las caricaturas.

# Fuerzas eléctricas, ley de Coulomb

Las cargas eléctricas se miden, o se expresan, en *coulomb*. Un coulomb equivale a 6,24 trillones[1] de electrones.

Las cargas eléctricas del mismo signo se repelen, y las de signo opuesto se atraen. De acuerdo con el principio de acción y reacción, esas fuerzas son de igual intensidad o módulo. Su valor está dado por la *ley de Coulomb*:




$$F = k\frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Las letras $q_1$ y $q_2$ representan dos cargas eléctricas, en coulomb d es la distancia entre las cargas, en metros. *F* es la fuerza con la que se atraen o se repelen las cargas, según su polaridad, y se obtiene en newton. La *constante electrostática k* vale aproximadamente[2] $9 \times 10^9$ N.m$^{-2}$.C$^{-2}$, donde N es newton, m metro y C coulomb (metro a la menos dos es lo mismo que uno sobre metro al cuadrado.)

Recordemos que un newton es la fuerza que, aplicada a un cuerpo de un kilogramo de masa, en cada segundo que transcurre, le hace cambiar su velocidad en un metro por segundo.

**Ejemplo.** ¿Con qué fuerza se repelen dos gotas de niebla separadas una millonésima de metro, y cargadas cada una con una carga de un billonésimo de coulomb?[3]

**Respuesta:** F = $9 \times 10^9$ N.m$^{-2}$.C$^2$ × $10^{-12}$ C × $10^{-12}$ C / ($10^{-6}$ m)$^2$; F = $8{,}99 \times 10^{-3}$ N, casi la centésima parte de un newton, o aproximadamente un gramo. (Esa fuerza parece pequeña, pero es mucho mayor que el peso de una gota de niebla.)

Hay otras unidades de carga además del coulomb; por ejemplo el *faraday*, equivalente a un mol de electrones, o sea $6{,}02 \times 10^{23}$ de esas cargas elementales. Otra es la *ues*, la unidad electrostática de carga, también llamada statcoulomb (statC) o franklin (Fr). La equivalencia es 1 C = 2.997.924.580 statC.

Cuando una carga de un coulomb pasa de un sitio a otro en un tiempo de un segundo, se dice que circula una corriente de un ampere. Por eso al coulomb se lo llama también *ampere segundo*.



La carga que acumula alguien cuando se levanta de un asiento de plástico es del orden de un millonésimo de coulomb, suficiente para ocasionar molestias cuando se descarga bruscamente al tocar tierra, o un objeto grande. En la foto, llavero semiconductor, para descargarse suavemente y sin molestia.



Se supone que el incendio del dirigible Hindenburg, lleno de hidrógeno combustible, obedeció a una descarga electrostática en el momento de tocar tierra, en 1937.

[1] En la Argentina y demás países de habla española un trillón es un millón de millones de millones, o sea $10^{18}$ unidades. Lo mismo vale para el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte. Pero en los Estados Unidos de América un trillón es apenas $10^{12}$, lo que aquí llamamos un billón. Eso es fuente de errores de traducción y de confusiones en algunos casos.

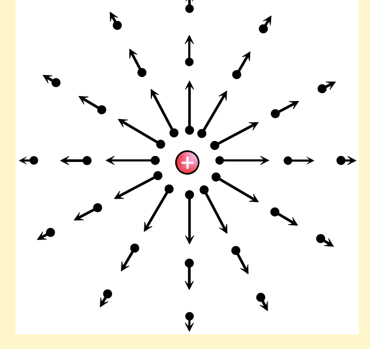
[2] El físico escocés James Clerk Maxwell determinó en 1864 que el valor exacto de esa constante es $c^2/10^7$ N.s$^{-2}$.C$^2$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío, hoy supuesta exactamente 299.792.458 metros por segundo.

[3] La millonésima parte de un metro se llama *micrón*, *micrómetro* o *micra*. La billonésima parte de un coulomb es un *picocoulomb*.

## Campo eléctrico; representación mediante líneas

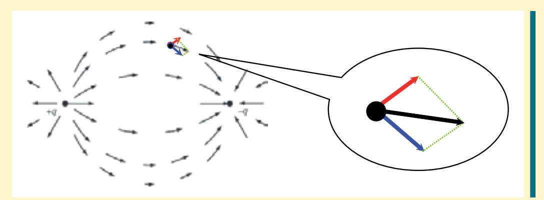
Michael Faraday (1791–1867), hijo de herrero, tuvo sólo estudios básicos y trabajó desde niño en una imprenta. Un día fue a una conferencia de Humphry Davy, un físico famoso; tomó notas, las encuadernó en la imprenta y se las obsequió al sabio. Éste, impresionado, lo contrató como ayudante de laboratorio. Ahí inventó el motor y el transformador. Su idea más brillante, que sirvió a Maxwell para entender la electricidad y el magnetismo, fue la de *líneas de fuerza*, hoy llamadas líneas de campo. Mucho después, cuando le preguntaron a Davy cuál había sido su mayor descubrimiento, respondió sin dudar: "*Faraday*".

Para trazar las líneas de campo correspondientes a un conjunto de cargas, imaginemos una carga adicional positiva, llamada carga de prueba, y veamos qué fuerzas de atracción y de repulsión recibe en cada posición del espacio. La dirección de la fuerza resultante o conjunta, es la de la línea de campo; y el cociente entre esa fuerza y la carga de prueba es la *intensidad de campo* en ese lugar.



Por ejemplo, las líneas de campo correspondientes a una única carga positiva son líneas rectas radiales. Los puntos negros indican diferentes posiciones de la carga de prueba, que recibe fuerzas de repulsión, más débiles cuando está lejos.

Las líneas de campo de más de una carga se obtienen al considerar todas las fuerzas que actúan sobre la carga de prueba.

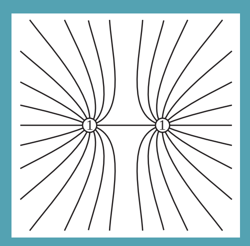


**Líneas de campo de dos cargas del mismo valor y de polaridad opuesta. En rojo, la fuerza de repulsión de la carga positiva. En azul, la atracción de la negativa. En negro, la fuerza resultante.** *(Derecha, detalle ampliado.)*

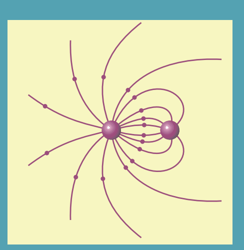
La intensidad del campo eléctrico se expresa en N/C, newton por cada coulomb, Se verá más adelante que eso es lo mismo que V/m, volt por cada metro. Se designa con la letra **E**.

## Polarización

La *polarización* es la separación de las cargas eléctricas en positivas por un lado



Líneas de campo de dos cargas del mismo valor y de la misma polaridad.

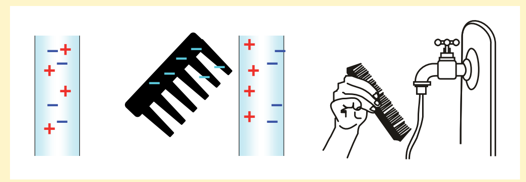


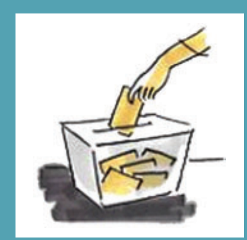
Líneas de campo correspondientes a dos cargas desiguales y de polaridades opuestas.




En ciencias la palabra *"por"* tiene dos significados: uno es el de multiplicar, como cuando decimos que cinco por ocho es igual a cuarenta. Otro significado es el de dividir, como en *metros por cada segundo*, que escribimos *m/s*; o newton por coulomb, *N/C*.

y negativas por otro. Por ejemplo, si frotamos un peine, posiblemente, se cargue negativamente. Al acercarlo a un delgado chorro de agua, el peine atrae las cargas positivas y rechaza las negativas. Como las positivas están, ahora, más cerca del peine, la fuerza de atracción es mayor que la de repulsión que actúa sobre las cargas negativas, más alejadas. Predomina, entonces, la atracción, y el chorro se desvía. Éste es un caso de polarización.

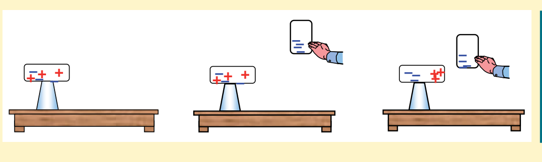




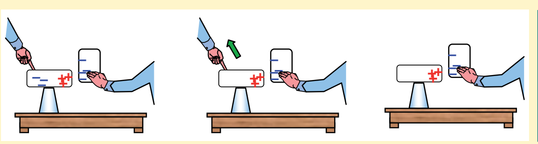
Cuando las opiniones políticas se dividen en dos categorías opuestas y casi balanceadas, se dice, también, que se polarizan.

## Carga por inducción electrostática

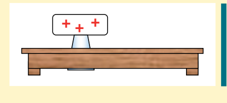
Es posible, a partir de un cuerpo cargado negativamente, obtener otro cargado positivamente.



**Cuerpo neutro. Se le acerca un cuerpo *inductor*, cargado negativamente. El cuerpo neutro se polariza.**



**Sin retirar el inductor, tocamos el cuerpo polarizado. Las cargas negativas, rechazadas por el inductor, escapan a tierra.**



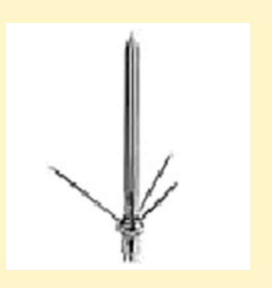
**El cuerpo que era neutro quedó cargado positivamente. Eso fue un ejemplo de *carga por inducción*.**



Un buscapolos electrónico de pilas enciende cuando se le acerca un cuerpo cargado negativamente, o cuando se le aleja uno cargado positivamente; sirve así para determinar la polaridad de las cargas.

## Distribución de cargas, efecto de puntas

En los cuerpos que conducen bien la electricidad, las cargas de la misma polaridad, al rechazarse, se ubican en los contornos, y especialmente, en las puntas. Eso es útil para proteger los edificios de descargas atmosféricas violentas. Las cargas se acumulan en las puntas del pararrayos y escapan casi silenciosamente al aire; o, si son muchas, lo hacen de modo explosivo, pero sin daños, porque la corriente circula por un cable grueso conectado a tierra.



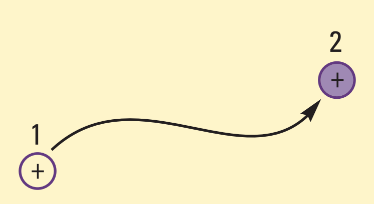
A veces, en la oscuridad, se ven fulgores en los mástiles de las embarcaciones, y hasta en personas subidas a sitios elevados. Quizás el fulgor con el que se representa a santos y profetas se haya visto alguna vez realmente, como efecto electrostático.



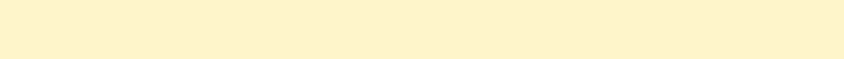
La santa aureola, gloria de Jehová, o fulgor divino, es parte de la tradición iconográfica.

## ■ Potencial eléctrico y diferencia de potencial

Para llevar una carga de un sitio a otro no habría que hacer ningún trabajo, si esa carga estuviera muy alejada de otras que pudieran atraerla o rechazarla. Pero si actúan fuerzas de interacción con otras cargas, en general, será necesario realizar trabajo –o recibirlo– para trasladar una carga desde un punto a otro. La *diferencia de potencial* entre esos dos puntos es el cociente entre ese trabajo[4] y el valor de la carga trasladada.

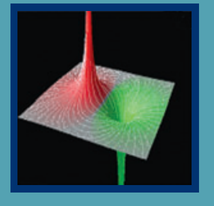



Por ejemplo, si por la acción de otras cargas (que no hemos dibujado), para trasladar una carga de dos coulomb desde el punto **1** hasta el punto **2** hay que hacer un trabajo de diez joule, entonces la diferencia de potencial, entre esos puntos, es de cinco joule por cada coulomb, ó 5 J/C. La unidad J/C se llama *volt*, y se simboliza con la V mayúscula.



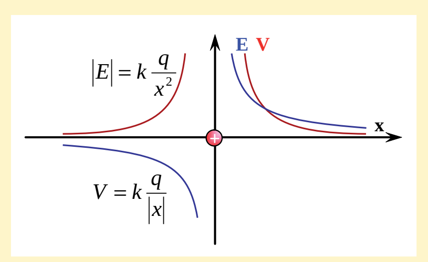

El símbolo triangular es la letra griega delta mayúscula, y significa diferencia. Otro nombre para la diferencia de potencial es el de *tensión* eléctrica.

Si se elige un punto convencional o arbitrario de potencial nulo, por ejemplo el infinito, o tierra, entonces se puede hablar del *potencial* eléctrico en un punto.



Potencial de dos cargas opuestas: en rojo la positiva y en verde la negativa. En blanco, las líneas de campo. Llevar una carga en el campo producido por otras es semejante, en lo que al trabajo respecta, a caminar entre colinas y valles.

## ■ Campo y potencial generado por una carga




La línea azul representa la intensidad del campo eléctrico, que disminuye con la distancia. La carga de prueba es empujada hacia la derecha en la parte positiva del eje **x**, y en el sentido opuesto del otro lado; por eso el campo invierte su signo. La línea roja representa el potencial, proporcional al trabajo necesario para traer una carga de prueba desde el infinito hasta determinada distancia de la carga central. Las barras verticales indican el módulo de la magnitud. La fór-



Los pájaros no se dañan cuando tocan puntos de igual potencial. Por desdicha, a veces unen puntos bajo tensión.

[4] Recordemos que el trabajo se expresa en joule. Un joule es el trabajo de una fuerza de un newton que se desplaza un metro hacia adelante.

mula de *E* se obtuvo de dividir por una de las cargas la expresión de la fuerza de la ley de Coulomb. La de *V* resulta del cálculo integral, que no se explica aquí.

## ■ Capacitancia y capacitores

Un capacitor, o condensador, es un objeto construido especialmente para almacenar cargas eléctricas. Se usan mucho en los circuitos electrónicos para retardar señales o para separar las de diferente frecuencia. La forma más difundida es el *capacitor plano*, formado por dos placas conductoras paralelas, separadas por un *dieléctrico*, o materia aislante.




Hay capacitores de muchas formas constructivas. La más simple es un disco aislante metalizado en ambas caras, con dos alambres soldados y recubierto de plástico para mejor aislación. Se hacen también de papel y aluminio, o de plástico aluminizado, y se enrollan para que ocupen menos sitio. Los más pequeños (como el de la derecha) se llaman *electrolíticos polarizados*, y sólo sirven para una polaridad; la opuesta los daña.

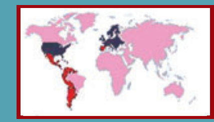
La *capacitancia* o *capacidad* de un capacitor es el cociente entre la carga y la tensión eléctrica entre sus placas. Se mide en coulomb por cada volt, C/V, y esa unidad es el *farad*, cuyo símbolo es F. Son más usuales los submúltiplos microfarad (μF), nanofarad (nF) y picofarad (pμF). La capacitancia de un capacitor plano se obtiene con esta fórmula:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{A}{d_o}$$

*C* es la capacitancia, en farad (F). No se debe confundir con la C de coulomb. Épsilon sub–erre es la permitividad relativa del material aislante (por ejemplo, la de algunos materiales cerámicos vale 60; la del plástico, 3; la del vacío, 1, y la del aire, aproximadamente 1; no tiene unidades). Épsilon sub–cero vale $8{,}854 \times 10^{-12}$ F/m. A es el área de una de las placas, en metros cuadrados; y *d* es la separación, en metros, entre las placas.

En realidad la constante $\varepsilon_0$ se puede obtener de la constante electrostática *k*, mediante la igualdad $\varepsilon_0 = 1/(4.\pi.k)$, donde π es el famoso número pi, aproximadamente igual a 3,1416. Por eso, en muchos libros, en vez de *k* ponen $1/(4.\pi.\varepsilon_0)$.

**Ejemplo** ¿Qué capacitancia tiene un capacitor de placas de un metro cuadrado



- En España castellanizan los nombres de todas las unidades (neutonio, culombio, hercio), pero en nuestro país la costumbre es hacerlo sólo con algunas, entre ellas el faradio. Aquí es común oír watt y vatio; volt y voltio; pero es raro que digan amperio; muchos prefieren la palabra ampere, pronunciada a la francesa, *ampère*, aguda y sin la e final, aunque con la ere local. Conviene hablar bien, pero también respetar las costumbres.



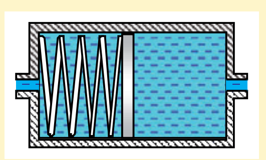
- La capacitancia entre un pie y tierra es de unos 10 pF para el calzado elevado, y de 40 pF para el bajo.

cada una, separadas por una lámina de polietileno de 20 micrones de espesor, como el de una bolsa de residuos? La permitividad relativa de este material vale 2,5.

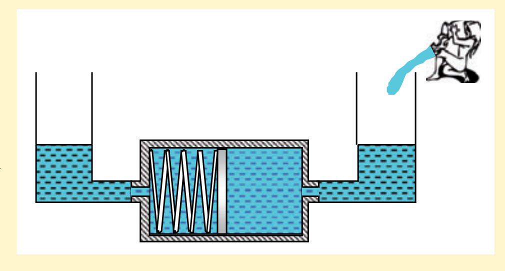
**Respuesta** $C = 2{,}5 \times 8{,}854 \times 10^{-12}$ F/m $\times$ 1 m$^2$/20 $\times 10^{-6}$ m

$C = 1{,}107 \times 10^{-6}$ F, aproximadamente un microfarad.

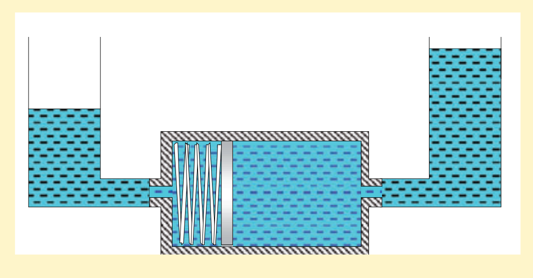
## ■ Modelo mecánico de un capacitor



Un modelo es una comparación con algo conocido, que sirve para entender mejor un fenómeno.[5] Comparemos un capacitor eléctrico con un cilindro en el que desliza un pistón. La diferencia entre el volumen de líquido almacenado a la derecha del pistón y el volumen de la izquierda, representa la carga eléctrica del capacitor, ahora nula porque el resorte está flojo. La diferencia de presión entre los compartimientos se compara con la diferencia de potencial, o tensión; y el caudal en metros cúbicos por segundo equivale a la corriente en ampere. Un resorte duro en un tanque chico representa un capacitor de poca capacitancia; un resorte blando en un tanque amplio, uno de capacitancia mayor. En la figura, el resorte está en su posición natural, sin deformación de compresión ni de tracción. La carga y la tensión valen cero, y la presión en los dos compartimientos es la misma.



Si en tales condiciones se inyecta agua por la derecha, el líquido circulará, al inicio, como si no hubiera resorte ni pistón, sino un caño directo, puesto que el resorte inicialmente está flojo. Pero a medida que el resorte se comprima, ejercerá una fuerza resistente.



Finalmente, el resorte queda comprimido y en equilibrio con la diferencia de nivel. Eso equivale a un capacitor cargado por el que no circula corriente. Hay tensión, o diferencia de potencial, y hay carga.

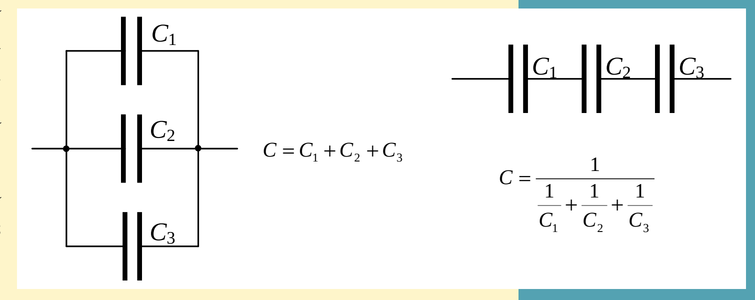


Grandes capacitores de 20.000 V y 1 µF. En las líneas de distribución de energía eléctrica disminuyen el exceso de corriente demandada por motores. Esa operación se llama corrección del factor de potencia.

[5] Se critica, a veces con justicia, el uso de modelos en el estudio, porque sólo son comparaciones simbólicas que aunque orienten el conocimiento, no reemplazan la realidad. Pero lo mismo se podría decir de cualquier idea que nos formemos de los hechos, como lo hizo el filósofo Platón hace 24 siglos.

## Asociación de capacitores; elastancia

Si conectamos varios capacitores en la conexión llamada *en paralelo* (izquierda), la capacitancia del conjunto es igual a la suma de las capacitancias parciales. Si, en cambio, están en serie (derecha), la capacitancia conjunta o equivalente está dada por una fórmula más complicada.




Pero, si llamamos *elastancia* a la inversa de la capacitancia, 1/C, y la designamos con la letra S, el cálculo se simplifica, porque la elastancia de varios capacitores conectados en serie, es igual a la suma de las elastancias individuales: $S = S_1 + S_2 + S_3$.

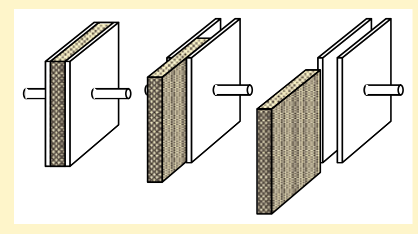
## Energía almacenada en un capacitor

La energía que acumula un capacitor se puede calcular con cualquiera de las siguientes fórmulas.[6]

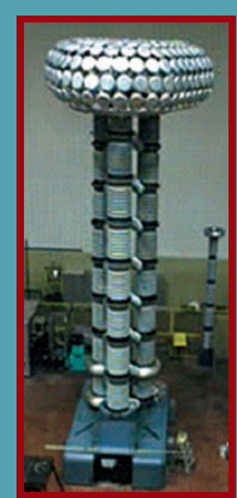
$$E_e = ½\ CV^2 \qquad E_e = ½\ \frac{Q^2}{C} \qquad E_e = ½\ QV$$

$E_e$ es la energía electrostática[7] acumulada, en joule; $C$ es la capacitancia, en farad; $Q$ la carga, en coulomb, y $V$ la tensión, en volt.

**Ejemplo.** Un capacitor de un microfarad cuyo dieléctrico tiene una permitividad relativa igual a cuatro, se conecta a una fuente de tensión de mil volt. (a) ¿Cuánto vale la energía electrostática acumulada? (b) ¿Cuánto vale la carga? (c) Y si después, ya desconectado de la fuente, se le retira el dieléctrico y queda sólo el aire ¿cuánto vale la nueva tensión? (d) ¿Y la nueva energía?



**Respuestas.** (a) $E_c$ = ½ $10^{-6}$ F . (1.000 V)², $E_c$ = 500.000 J. (b) Q = C.V; Q = $10^{-6}$ F. 1.000 V; Q = 0,001 C. (c) Al retirarle el dieléctrico de permitividad



Generador de impulsos de tensión de un millón de volt, para comprobar la aislación de instalaciones transmisoras de energía eléctrica. Los 24 capacitores acumulan una energía de diez mil joule. La cabeza redonda evita las puntas y las descargas al aire.

[6] Los cursos detallados ofrecen la demostración de todas las fórmulas, y eso contribuye a su empleo comprensivo. En esta reseña se omiten, en favor de otras informaciones. Pero se recomienda consultar demostraciones, y también intentarlas por medios propios.

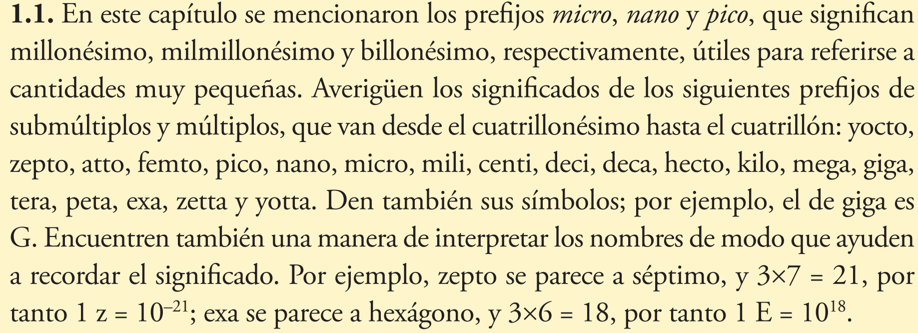
[7] Esa energía es una forma de energía potencial, o energía de posición, puesto que depende de la ubicación de las cargas electrostáticas en las placas o armaduras del capacitor.

relativa 4, la capacidad disminuye cuatro veces, y ahora es de 0,25 μF. La carga, como está desconectado de la fuente, se mantiene; entonces la nueva tensión vale $V_2 = Q/V_2$; $V_2 = 0{,}001\ \mathrm{C} / 0{,}25.10^{-6}\ \mathrm{F}$; $V_2 = 4.000\ \mathrm{V}$. (d) $E_{c2} = ½\ 10^{-6}\ \mathrm{F}\ .\ (4.000\ \mathrm{V})^2$; $E_{c2} = 2.000.000\ \mathrm{J}$.

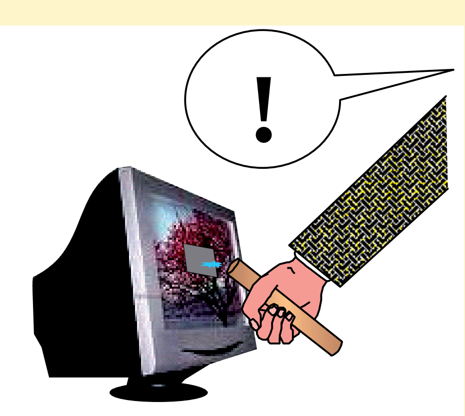
La tensión se cuadruplicó al quitar el dieléctrico, y lo mismo habría ocurrido si se hubieran distanciado suficientemente las placas del capacitor para que su capacidad disminuyese. Justamente, aparecen tensiones altas cuando nos levantamos de una silla aislante, cuando nos quitamos ropa de fibra sintética y cuando separamos un peine del pelo; no cuando nos sentamos o nos vestimos.

El hecho de que el capacitor tenga al final una mayor energía electrostática acumulada, muestra que para retirar el dieléctrico es necesario efectuar un trabajo del mismo monto.

## Propuestas de estudio



**1.1.** En este capítulo se mencionaron los prefijos *micro*, *nano* y *pico*, que significan millonésimo, milmillonésimo y billonésimo, respectivamente, útiles para referirse a cantidades muy pequeñas. Averigüen los significados de los siguientes prefijos de submúltiplos y múltiplos, que van desde el cuatrillonésimo hasta el cuatrillón: yocto, zepto, atto, femto, pico, nano, micro, mili, centi, deci, deca, hecto, kilo, mega, giga, tera, peta, exa, zetta y yotta. Den también sus símbolos; por ejemplo, el de giga es G. Encuentren también una manera de interpretar los nombres de modo que ayuden a recordar el significado. Por ejemplo, zepto se parece a séptimo, y $3{\times}7 = 21$, por tanto $1\ \mathrm{z} = 10^{-21}$; exa se parece a hexágono, y $3{\times}6 = 18$, por tanto $1\ \mathrm{E} = 10^{18}$.



**1.2.** Demuestren que un newton por cada coulomb es lo mismo que un volt por cada metro, a partir de que 1 V = 1 J/C y que 1 J = 1 N.m.

**1.3.** Adhieran con cinta un rectángulo de papel de aluminio (sirve el de la envoltura de un alfajor) a la pantalla de un televisor antiguo.[8] Apaguen el televisor. Después no toquen con la mano directamente el papel, porque recibirán una buena sacudida. Pero acerquen una llave o cuchara, que pueden tener en la



La llamada colita rutera es útil en los transportes de combustible, porque evita chispas en el momento de la carga. La leyenda de que evita dolores de cabeza carece de fundamento.



Los pelos del experimentador, conectado a 50.000 V y aislado de tierra, demuestran que las cargas de la misma polaridad se repelen.

[8] Se necesita un televisor de tubo de rayos catódicos; no sirve, para esta prueba, uno chato de plasma o de cristal líquido.

mano con confianza, o conectarlas a tierra para mayor tranquilidad. Estimen o midan la longitud de la chispa que saltará entre el papel metálico y ese objeto. A partir del dato de que el aire resiste aproximadamente un campo eléctrico de tres mil volt por milímetro,[9] estimen qué tensión había entre ambos cuerpos antes de que saltara la chispa y se produjese la descarga. Conviene no poner un papel metálico demasiado grande, porque la chispa sería demasiado enérgica y podría dañar a personas y bienes.

## Otras fuentes de estudio

En Internet hay cursos gratuitos de todos los niveles, desde los apropiados para niños pequeños que aún no saben leer, hasta temas especializados de investigación. Se sugieren como palabras de búsqueda *electrostática*, *capacitores*, *recreativa*, *Perelman*.

[9] En lugares de gran altitud el aire es menos aislante. Resiste un trece por ciento menos de campo eléctrico, por cada mil metros que se ascienda sobre el nivel del mar.

# Aplicaciones de la electrostática







- Frederick Gardner Cottrell (el más alto) experimenta en 1916 con un aparato electrostático para capturar en las chimeneas la niebla y el hollín y evitar que contaminen el ambiente.
- Arriba, el humo sale libremente por la chimenea sin tensión eléctrica.
- Abajo, unos alambres metálicos a 30.000 volt capturan las partículas.

# Aplicaciones electrostáticas

## Electrostática en la industria

Las cargas estáticas (inmóviles o, que apenas se mueven) fueron una curiosidad recreativa y filosófica hasta el siglo XVII. Pero la Revolución Industrial les halló aplicaciones útiles, entre ellas la de eliminar el humo de las chimeneas, que en las grandes ciudades ensuciaba tanto el aire que a la gente enfermaba; además de que se ensuciaba la ropa que ponían a secar.[1]



Captura de niebla en una taza de café. A veces se forma una capa de niebla en la superficie, que desaparece cuando se acerca un bolígrafo electrizado por frotamiento.

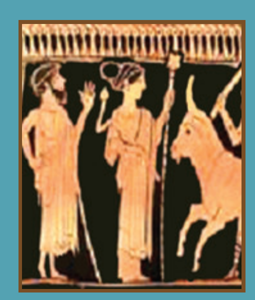
## Precipitación de humos y nieblas

El humo es una mezcla heterogénea de gases de combustión y partículas sólidas de carbón, y líquidas de grasa y de agua. Esas partículas son muy pequeñas, tardan mucho en caer y permanecen en suspensión en el aire. La niebla se compone de gotas muy pequeñas de agua líquida, también en suspensión. El esmog (de *smog*, contracción de *smoke* y *fog*, humo y niebla en inglés) es humo y niebla combinados, que aparece en las ciudades industriales, o en el campo cuando hay incendios.



niebla humo esmog

Para atrapar las partículas, se las carga con alambres alimentados con algunas decenas de miles de volt, y se las atrae con placas o rejas cargadas con la polaridad opuesta. Cuando el filtro se llena, se lo sacude para que el hollín y la grasa se desprendan y caigan en una bolsa, y se desechan sin tanto daño para el ambiente



Ío, la viajera, convertida en vaca por Zeus para esconderla de los celos de Hera. (Jarrón del año 750 a.C.)

[1] Recordemos que el trabajo se expresa en joule. Un joule es el trabajo de una fuerza de un newton que se desplaza un metro hacia adelante.

como el que representaría tirarlos a la atmósfera. Una partícula cargada de electricidad se llama *ion*,[2] y el acto de cargarla, *ionización*. Los iones se mueven en los campos eléctricos.




**Para capturar el humo en una chimenea se cargan las partículas con alambres de una polaridad, y después se las atrae con placas cargadas con la polaridad opuesta.**

El filtro electrostático o precipitador de Cottrell, inventado en 1916, no sólo sirve para limpiar los gases de las chimeneas, o el aire que ingresa a un edificio.[3] Se utiliza también para condensar nieblas producidas artificialmente con fines industriales.

Por ejemplo, una sustancia de gran aplicación en la fabricación de detergentes y champúes es el ácido sulfónico, que se obtiene a partir de la quema de azufre en un ambiente humedecido con pulverizadores de agua. El ácido aparece en forma de niebla muy fina que tarda mucho en caer. Para acelerar su recolección, se la captura con precipitadores electrostáticos, formados por cientos de alambres verticales conectados  a decenas de miles de volt. Las gotitas de niebla ácida se adhieren a los alambres, y gotean sobre un recipiente donde se recoge el producto.



Algunos filtros de humo para cocinas se basan en la captura electrostática de la niebla de grasa, que se quema a baja temperatura por la acción de rayos ultravioletas.

## Erosión de superficies para adherencia de pinturas

Es difícil pintar rótulos en bolsas de plástico, y que la pintura quede bien adherida y no se salga con la manipulación. Puesto que la adherencia de la pintura a una base es un fenómeno eléctrico, antes de imprimir las leyendas y marcas sobre las superficies plásticas, se las hace pasar por generadores de alta tensión que dejan la superficie, momentáneamente, cargada; entonces, la pintura se adhiere bien. El campo eléctrico es tan intenso que se desprenden algunas partículas microscópicas del plástico y, gracias a eso, la tinta se adhiere más.

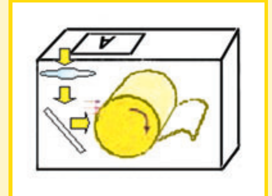


Los frescos de la Capilla Sixtina en el Vaticano, pintados por Miguel Ángel Buonarroti entre 1508 y 1512, debieron limpiarse varias veces del humo de las velas de las ceremonias y del tránsito de automóviles. Ahora hay filtros de aire, algunos de ellos electrostáticos.

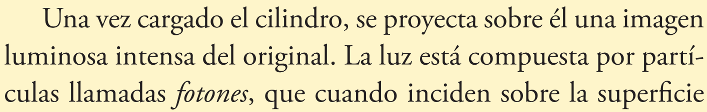
[2] Ion, en griego, significa: *el que va*, y se relaciona con la diosa Ío, que viajó por el mundo para huir de los celos de Hera, esposa de Zeus, padre de los dioses en la mitología griega.

[3] El aire verdaderamente acondicionado debe estar libre de microbios y tener una humedad controlada. Para eso, y aunque sea verano, se lo calienta para esterilizarlo, se lo enfría para que se condense la humedad excesiva (que gotea afuera), se lo vuelve a calentar para darle una temperatura agradable, y se lo humecta con agua estéril si es necesario. Pero muchos llaman aire acondicionado simplemente al aire frío en verano, o caliente en invierno, filtrado apenas con una esponja.

## Xerografía



Xerox significa, en griego, a la vez *seco* y *cera*. Para obtener una fotocopia con ese método se carga eléctricamente un cilindro aislante con la ayuda de un alambre que se mantiene cerca de su superficie, y conectado a una tensión de unos diez mil volt.



Una vez cargado el cilindro, se proyecta sobre él una imagen luminosa intensa del original. La luz está compuesta por partículas llamadas *fotones*, que cuando inciden sobre la superficie cargada, le arrancan electrones, o sea que descargan localmente el material previamente cargado.

A continuación se espolvorea el cilindro con polvo negro ceroso, el tóner, el cual se adhiere sólo donde no dio la luz, o sea, en las partes cargadas que corresponden al negro del original.

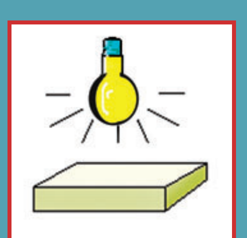
Después, se aprieta un papel contra el cilindro, para transferirle el tóner. Se calienta el papel; la cera se funde, y la imagen queda fija. A veces, cuando el papel se atasca y lo retiran antes de este último proceso de fusión, la copia se borra con los dedos.

La xerografía es una muy útil aplicación de la electrostática, que influyó mucho en el flujo de la información impresa, quizá tanto como la popularización de la imprenta en el siglo XV.[4]

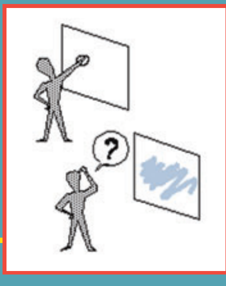
Originalmente los cilindros xerográficos eran de selenio, cuyo óxido superficial es aislante de la electricidad. Hoy se usan diversos plásticos más efectivos y baratos.

Las impresoras láser son fotocopiadoras en las que la imagen luminosa, en vez de provenir de un original fuertemente iluminado, se graba directamente con un rayo láser en la superficie de un cilindro previamente cargado eléctricamente.

Una ventaja de las impresoras láser, en comparación con las de tinta líquida, es que las impresiones resisten las salpicaduras de agua sin que se corra la tinta.



- La humedad de Buenos Aires, junto a uno de los ríos más grandes del mundo, impide que las cargas eléctricas se mantengan en su sitio. Por eso, en muchos centros de copiado almacenan el papel en vitrinas con una lámpara encendida, para mantenerlo más caliente que el ambiente y evitar la condensación de agua, que humedece el cilindro y lo descarga.





- Es difícil mantener limpia una ventana de plástico de interiores, porque al pasarle un trapo se carga eléctricamente y captura el polvo. En cambio a la intemperie la luz del día la descarga.

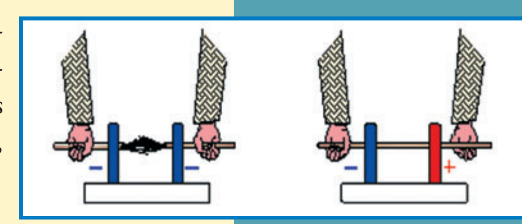
## Empalme de hilos

En las hilanderías se evitan los nudos en los hilos, porque dificultarían el trabajo del telar, aparecerían en el tejido y disminuirían su calidad. Para empalmar dos

---

4 En 1950 tardaban media hora en hacer una fotocopia de las llamadas *en el acto*, y la entregaban húmeda. Por ser lentas y caras, no se usaban en las escuelas; los alumnos calcaban los mapas, o los maestros reproducían originales trazados con lápices de tinta, cuyo pigmento se impregnaba en una gelatina húmeda que se usaba después como un sello para imprimir hasta cincuenta copias. Ese rudimentario aparato se llamaba *gelatógrafo*, y lo construía el propio docente en una lata rectangular de dulce de batata, o lo compraba en librerías. En comparación con los estudiantes de hace medio siglo, los actuales tienen posibilidades de estudio mil veces mayores.

hilos les aplican tensión, entonces sus fibras se separan por la repulsión de las cargas de la misma polaridad. En esas condiciones aproximan los extremos, y las fibras se entrecruzan. Cuando les dan a los hilos polaridades opuestas, las fibras se unen y el hilo queda entero, sin nudo, como si nunca hubiera sido cortado.[5]




## Transferencia de hojas de papel en impresoras

Las impresoras más comunes, de uso hogareño y de oficina, hacen correr las hojas de papel con piezas móviles de goma. Pero, a veces, pasan varias hojas a la vez, o ninguna, porque la adherencia entre las hojas es mayor que con la goma gastada o sucia, y el papel se atasca. En impresoras industriales las hojas se toman con ventosas y no por arrastre; pero hace falta una pequeña bomba de vacío. Una solución más silenciosa, compacta y hoy muy barata, es atraer las hojas electrostáticamente, con un pequeño generador de unos miles de volt.



Si se apoya una hoja de papel o una radiografía contra la pantalla de un monitor de rayos catódicos, se adhiere, atraída por las cargas eléctricas de la pantalla.

## Ozonizadores

El ozono, u $O_3$, es un gas cuyas moléculas están formadas por tres átomos de oxígeno cada una. Normalmente, ese gas sólo existe en la alta atmósfera, adonde llega la radiación ultravioleta del Sol. Esos rayos desarman las moléculas de $O_2$ y se forma $O_1$, $O_2$ y $O_3$.[6]

Para desinfectar y desodorizar baños públicos se instalan ozonizadores, que son aparatos que producen ozono en una concentración tolerable durante media hora, o una. Para generar ese gas hay que desarmar las moléculas del oxigeno diatómico ordinario del aire; eso se consigue con un generador de unos seis mil volt.[7]




Generador de ozono para baños. El límite higiénico es de 0,1 ppm (partes por millón), o sea, como máximo, una molécula de $O_3$ cada diez millones de las otras moléculas de $O_2$ y $N_2$ del aire. Elimina microbios, y da un olor particular al aire, como el que se percibe después de una tormenta eléctrica, y que muchos llaman olor a tierra mojada.

## Pantallas de cristal líquido

Una pantalla de cristal líquido, en inglés *liquid crystal display*, o LCD, está formada por dos vidrios paralelos entre los que se aloja una capa de gel compuesto

---

5 Actualmente se usan más los empalmes de aire comprimido.

6 El ozono en la alta atmósfera es útil para filtrar la radiación ultravioleta del Sol. Se cree que ciertos gases industriales, los fluorocarbonos que se usan en refrigeración y en envases de aerosol, destruyen esa capa protectora. Inversamente, la quema de combustibles genera ozono, cuyo exceso al nivel del suelo es tóxico para animales y plantas.

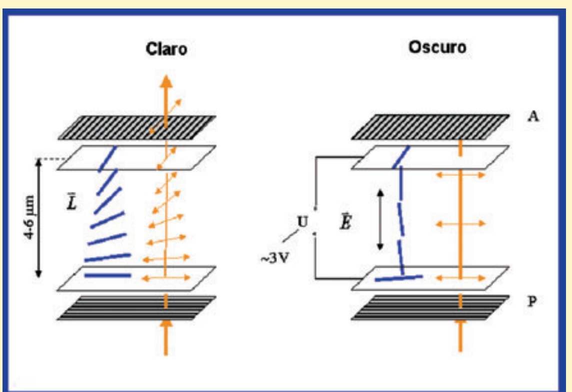
7 También se obtiene un efecto similar, aunque menos efectivo, con una lámpara de rayos ultravioleta protegida para que no dañe la vista. Este aparato, más pequeño, barato y de menor consumo que las antiguas autoclaves de vapor, se usa para esterilizar tijeras y navajas en las peluquerías.



Pantalla de un reloj en desuso, excitada directamente con una pila o batería.

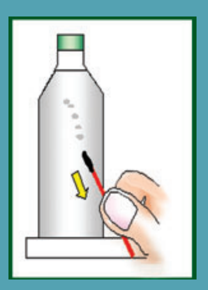
por partículas alargadas que se orientan en un campo eléctrico. Los vidrios tienen contactos de oro, tan delgados que son transparentes; y sólo se ven bajo ciertos ángulos. Esas pantallas se popularizaron en 1970. Como su funcionamiento es electrostático, no hay corrientes eléctricas permanentes (más que las de carga y descarga), entonces consumen muy poca energía, y se las puede usar en aparatos de pila.

Cuando se aplica tensión a los electrodos, las partículas se orientan y producen el efecto de Schadt–Helfrich en la luz, que consiste en un giro del plano en el que vibran las ondas luminosas, llamado plano de polarización. Si se observa el gel entre dos filtros polaroides, que dejan pasar sólo la luz que está polarizada en determinado ángulo, entonces cuando las partículas se orientan aparece el trazo del número o signo, y cuando se interrumpe la tensión y las partículas del gel se desorientan (se orientan cada una al azar), el trazo desaparece.




Efecto Schadt-Helfrich

Se puede improvisar un LCD con medios rudimentarios. En una botella de plástico transparente se pone diluyente de pintura y una pequeña cantidad de pintura de aluminio. Cuando se frota la botella con un paño, el plástico se carga y las partículas de aluminio se orientan; eso se nota como un cambio en el brillo de la pintura dentro de la botella.



Una botella de plástico con pintura de aluminio diluida registra la tensión alterna de 220 V de un cable aislado. El campo eléctrico orienta las escamas metálicas.

## Tubos de rayos catódicos

En electricidad, el ánodo es el polo positivo, y el cátodo, el negativo (de *ana*, hacia arriba, y *cata*, hacia abajo, en latín). El nombre genérico para referirse tanto al cátodo como al ánodo es *electrodo*. El científico británico William Crookes[8]



**Réplicas de tubos de Crookes. Se conecta el polo positivo al lateral, y el negativo al extremo. En el frente, pintado con pintura fluorescente, aparece un fulgor. La pequeña cruz de Malta rebatible hace sombra.**

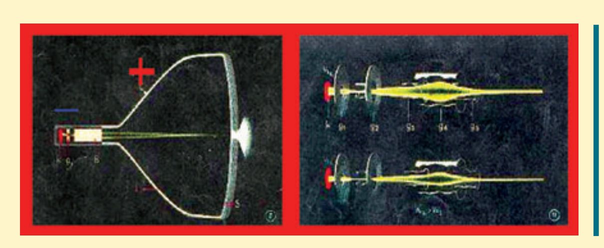


Los LCD son tan sensibles, que se los puede excitar con la electricidad estática generada al frotar los pies contra el piso.



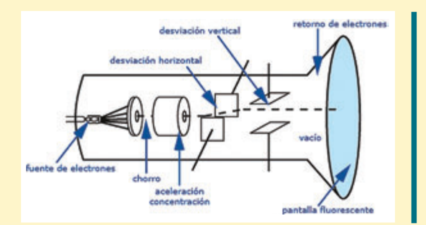
[8] En sus últimos años Crookes se hizo espiritista, y por eso perdió prestigio en círculos científicos. Pero en su juventud y madurez fue un investigador brillante, autor de numerosos descubrimientos, por los que obtuvo el título de Sir.

(1832–1919) estudió las corrientes eléctricas que atraviesan el aire encerrado en un tubo a diferentes presiones, y cuando hizo el vacío notó que algo salía en línea recta del polo negativo hacia el positivo, que hacía brillar materiales fluorescentes. Llamó a ese efecto *rayos catódicos*. Hoy sabemos que son electrones que salen del cátodo y viajan hacia el ánodo a través del espacio vacío.



**Tubo de rayos catódicos de TV o PC. Un filamento caliente emite electrones, y los atrae la envoltura lateral pintada con grafito conductor. Para que el haz no se disperse, se lo hace pasar por un tubo de potencial positivo, el anillo de enfoque.**

Donde incide el haz de electrones, la pantalla brilla. Unas bobinas alrededor del cuello del tubo, llamadas el yugo, generan campos magnéticos variables que desvían el haz para que trace la imagen. Lo mismo se puede hacer con placas laterales, dos verticales y dos horizontales, sometidas a tensiones alternas.




**Placas de deflexión horizontal y vertical en el tubo de rayos catódicos de un osciloscopio.**

## Tubos fluorescentes, de neón y pantallas de plasma

Los campos eléctricos, si son bastante intensos, pueden ionizar los átomos, o sea, arrancarles electrones y convertirlos en iones positivos (partículas cargadas positivamente) mientras que los electrones arrancados de los átomos son iones negativos. Esos iones se mueven cada uno hacia el polo de la polaridad opuesta, y en el camino chocan con átomos y les hacen aumentar su energía; los *excitan*. Cuando los átomos excitados vuelven a su estado normal, emiten la energía sobrante, a veces en forma de luz visible. Ése es el principio en el que se basan los tubos fluorescentes, las lámparas de neón y las pantallas de plasma. Se llama plasma a un gas que tiene ionizada casi la totalidad de sus átomos. Hay plasma dentro de un tubo fluorescente encendido, en una llama, en la superficie del Sol, en una chispa eléctrica, química o mecánica, y en las pantallas de plasma que usan muchos aparatos, y que funcionan como una gran cantidad de tubos fluorescentes diminutos.

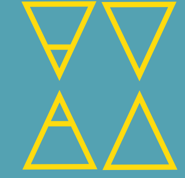
Para construir una pantalla de plasma se hace el vacío entre dos vidrios paralelos



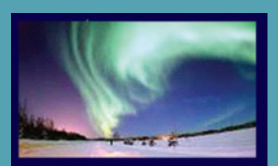

- Junto con las copias xerográficas, el tubo de TV ha sido quizás una de las aplicaciones más útiles de la electrostática en la comunicación de información.

- Cuando los electrones chocan contra el pigmento de una pantalla, sufren una frenada brusca, y eso hace que emitan rayos X. Su dosis es limitada y no daña la salud. Sin embargo, se recomienda a las embarazadas que no pasen muchas horas frente a un monitor de computadora o televisor muy cercano. El efecto se conoce como Bremsstrahlung, en alemán, radiación de frenado, y se descubrió en 1896.



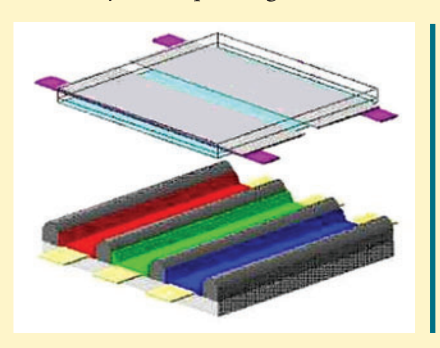


- Los cuatro elementos según la antigua alquimia, tierra, agua, aire y fuego, se podrían identificar con los cuatro estados de agregación de la materia: sólido, líquido, gas y plasma.



Aurora polar. Las partículas cargadas que emite el Sol se desvían en el campo magnético terrestre, excepto en los polos, donde ese campo es vertical y no impide que las partículas solares bajen y exciten los átomos de los gases del aire. Cuando los átomos vuelven a su estado normal, emiten luz.

cercanos, se llena ese espacio con gases a baja presión, y unos electrodos muy pequeños, uno por cada punto de la imagen, o símbolo, hacen que cuando se los conecta a una fuente de tensión eléctrica, ionicen el gas y atraigan los iones, que cuando chocan contra átomos, sin ionizar, los excitan; y estos átomos devuelven esa energía en forma de radiación ultravioleta, que incide contra una pintura fluorescente y hace que fulgure.



**Rojo, verde y azul: pigmento fluorescente. Negro: separadores aislantes. Amarillo: electrodos verticales; magenta, horizontales. El espectador ve desde arriba un punto luminoso donde se cruzan dos electrodos, en el instante en que estén bajo tensión.**

Las pantallas de plasma, o PDP (*plasma display panel*) son muy delgadas en comparación con los tubos de rayos catódicos, y consumen menos energía eléctrica que ellos.[9]

## Memorias electrostáticas



Una curiosa derivación del microscopio de efecto túnel fue el descubrimiento de que, además de electrones, se pueden arrancar átomos, y cambiarlos de sitio. La figura muestra la siglas IBM (International Bureau Machines, Máquinas de Oficina Internacional), compuesta con átomos de xenón depositados sobre una superficie de níquel. El efecto es útil para construir memorias muy pequeñas para computadoras.

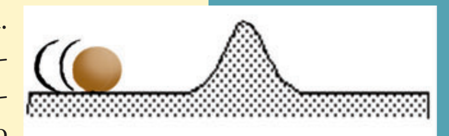
Las primeras computadoras de principios del siglo XX usaban válvulas de vacío, una especie de lámparas de filamento con electrodos adicionales, capaces de amplificar una corriente eléctrica y cumplir funciones lógicas como la de almacenar la información. En 1950, para la misma aplicación, se empezaron a usar transistores, mucho más pequeños y de menor consumo. En 1971 Dov Frohman inventó la EPROM, *Erasable Programmable Read-Only Memory* (memoria de lectura exclusiva programable y posible de borrar), conocidos como chips de memoria fija para las computadoras. Se los puede grabar mediante el procedimiento de aplicarles en un cierto orden tensión a sus patas; con eso quedan cargas eléctricas almacenadas permanentemente en millones de cristales internos. La presencia o ausencia de esas cargas se puede detectar desde las patas del chip, y en eso consiste su memoria.

El invento de Frohman, que recuerda el principio de funcionamiento de las

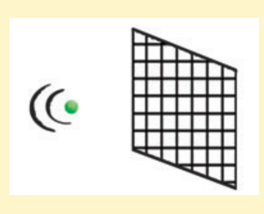
[9] En una época se consideraba, como índice de desarrollo de una comunidad, la cantidad de energía eléctrica que consumía cada habitante por año. Hoy ese mismo indicador tiene un significado a veces opuesto, porque una sociedad realmente avanzada aprovecha la energía, de la que consume escasa cantidad.

copias xerográficas, consistió en eliminar las cargas, cuando hace falta, con la exposición del chip a una fuente intensa de luz o de radiación ultravioleta, entonces la EPROM se puede programar o escribir otra vez.

## • Microscopio de efecto túnel



Imaginemos una bolita que se desplaza libremente hacia una loma. Si su velocidad es suficiente, la superará; y si es menor, volverá de regreso. Lo mismo pasa con un electrón disparado contra una reja negativa. Si el electrón tiene velocidad suficiente, la atravesará, y en el caso opuesto rebotará, rechazado por la reja de la misma polaridad. Sin embargo, a principios del siglo XX se notó que, unos pocos electrones de energía, que parecía insuficiente, atravesaban esa barrera. En broma, y pensando en la bolita y la loma, alguien preguntó: *¿Es que pasan, acaso, por un túnel?* Y así quedó ese nombre para designar un efecto que parece extraño, pero que la física cuántica explica a partir de las propiedades ondulatorias de toda la materia, y que se nota más en las partículas pequeñas.



El microscopio de efecto túnel explora una superficie con una aguja muy delgada, conectada a un potencial eléctrico que sólo arranque del material electrones por efecto túnel. Un circuito detecta cada vez que ocurre ese fenómeno, entonces se sabe que la aguja estaba pasando cerca de un átomo y le quitó un electrón. Con ese aparato se ven –indirectamente– átomos individuales.



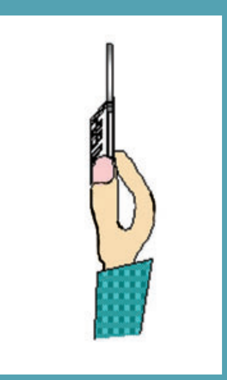
• Según fabricantes, vendedores y algunos usuarios, los filtros de pantallas hacen más cómodo el trabajo con monitores de rayos catódicos, y protegen la salud. Lo cierto es que la conexión a tierra del vidrio conductor evita las chispas.

## Propuestas de estudio

**2.1.** Con la ayuda de fuentes de información ajenas a este capítulo (libros, Internet, consultas a gente que sepa) determinen si es correcta la designación *"relojes de cuarzo líquido"* que usan algunas personas para referirse a los relojes de pantalla de cristal líquido, o LCD. Las pantallas de cristal líquido ¿contienen cuarzo? El cuarzo ¿es líquido a la temperatura ambiente? ¿En qué interviene el cuarzo en esos relojes, y otros de agujas móviles?

**2.2.** Hace veinte años los teléfonos públicos callejeros que contaban con iluminación de 220 V, tenían un cartel que decían PELIGRO, ALTA TENSIÓN. Hoy en cambio dicen PELIGRO, HAY TENSIÓN, puesto que la frase *alta tensión* tiene un significado específico en el ambiente industrial. Averigüen a qué tensiones se las llama muy baja, baja, media, alta y muy alta tensión.





Si se adhiere una mina de lápiz o un alambre a los contactos de una pantalla de cristal líquido, sirve como detectora de campos eléctricos; indica si hay o no tensión alterna en un cable, sin necesidad de pelarlo.

**2.3.** Estudien una aplicación industrial del tema de este capítulo, que no se haya tratado en él, por ejemplo, los altoparlantes electrostáticos, o ESL (*electrostatic loudspeakers*), el Gran colisionador de hadrones, el microscopio de ion de campo, los músculos artificiales, los relés o relevadores electrostáticos y la separación de granos de cereales y de moliendas.

**2.4.** Algunas personas se alarman por las chispas que saltan a veces entre la mano y la pantalla de un monitor de computadora, y en la creencia de que puedan dañar la salud interponen pantallas de vidrio conductor y algo oscuro que evitan ese efecto, y, supuestamente, interceptan radiaciones dañinas, como podrían serlo los rayos X. Investiguen el tema. Si esos filtros son útiles ¿por qué no los incorporan de fábrica? ¿Hay en el mercado propuestas similares –justificadas o no– para pantallas de plasma y de cristal líquido?

**2.5.** ¿Por qué las pantallas de los monitores de tubo de rayos catódicos se ensucian tan rápidamente, y más que los vidrios de las ventanas?

**2.6.** Construyan un detector electrostático como el de la figura ubicada en el margen izquierdo, y comprueben con él si los filtros de pantalla eliminan el campo eléctrico en las cercanías. (Conviene acercar y alejar el detector, para que indique.)

## Otras fuentes de estudio

A pesar de que sus datos carecen de respaldo académico, hay sitios en la web que constituyen fuentes útiles de información, y buenas orientaciones de búsqueda. Sin embargo, se propone una fuente de mayor seriedad académica es ***Interacciones a Distancia***, de A. Maiztegui, R. Ádám, S. Queiro, A. Rela y J. Strajman, Prociencia, Conicet, 1994, en la Biblioteca del Maestro y en http://www.inet.edu.ar, Capacitación, Materiales, Ciencias para la educación tecnológica.

# Inconvenientes de las cargas estáticas

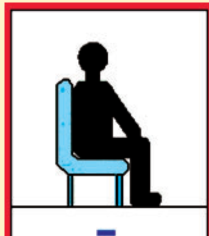


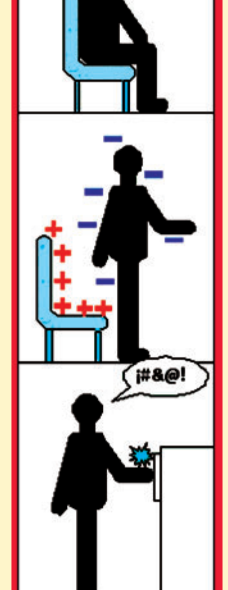
El hidrógeno del dirigible Hindenburg se incendia cuando la nave aterriza en Nueva Jersey, Estados Unidos, el 6 de mayo de 1937. Murieron 35 de sus 97 ocupantes, más una persona en tierra. El desastre lo habrían causado una fuga de gas y una chispa eléctrica, pese a que la tripulación realizó las maniobras de descarga correctas antes de echar amarras. Se especula también en un posible atentado contra ese símbolo del poderío tecnológico de la Alemania nazi, dos años antes de que estallara la Segunda Guerra Mundial.

# Inconvenientes de las cargas estáticas

## Sacudidas al tocar un coche o un mueble

Todos experimentamos alguna vez una sacudida molesta al tocar algo después de bajar de un coche, levantarnos de una silla de plástico o caminar unos metros sobre una alfombra de plástico, o muy seca. Cuando se separan dos cuerpos en contacto, muchos electrones exteriores de los átomos de un cuerpo pasan a los del otro, y así los dos cuerpos quedan cargados con polaridades opuestas.






Este efecto ocurre especialmente en lugares y días secos; es muy molesto, y la sorpresa puede causar movimientos bruscos, la caída de objetos que se tenían en las manos, y hasta incendios en depósitos de inflamables y estaciones de servicio, con daños personales y materiales.

Para evitar ese efecto hay varias soluciones. Una es aplicar un líquido antiestático a las alfombras y tapizados, por ejemplo glicerina. Esta sustancia es muy higroscópica, absorbe la humedad del ambiente y hace que la tela conduzca un poco la electricidad; con eso la persona se descarga a tierra a la vez que se levanta del asiento.[1]

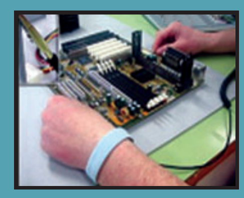
Hay alfombras que ya son conductoras, por sí mismas sin el agregado de productos, porque en su hilado se incorporan fibras de carbono, que además de darles robustez, las vuelven conductoras de la electricidad.

Un truco para evitar la carga es el de tomarnos de un cuerpo metálico grande durante todo el tiempo que tardamos en levantarnos de un asiento aislante.

Por ejemplo, si salimos de un coche, nos podemos tomar a la vez de la manija de la puerta; si nos levantamos de una silla, hagámoslo con una mano apoyada en un mueble conductor, o en una pata metálica de la misma silla. De esa manera derivamos a tierra las cargas en el mismo instante en el que se producen, sin dejar que se acumulen.



- La gran área de contacto del choque de palmas disminuye los microamperes por centímetro cuadrado de una descarga, y la consiguiente molestia. ¿Será ése el origen del difundido saludo?



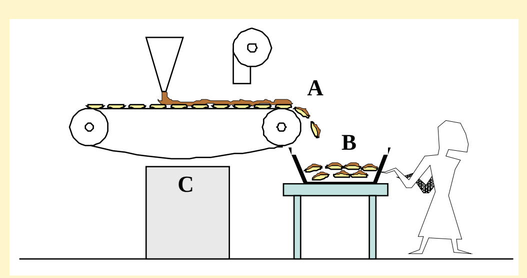
- El reparador conecta su muñeca a tierra para evitar chispas que puedan dañar los circuitos electrónicos. El cordón es poco conductor, para limitar la corriente si tomara contacto accidental con la fuente.

[1] Las mujeres suelen sufrir más que los varones esa clase de descargas de electricidad estática acumulada, posiblemente por una mayor sensibilidad neurológica, una piel más delgada, o una mayor área de contacto con el asiento.

Quizá por el clima húmedo de muchas regiones de la Argentina, aquí no tenemos muy desarrollados los medios de protección contra las incomodidades de la acumulación de cargas estáticas. En cambio, en hoteles de otros países se ven a veces cuadros semiconductores con un símbolo eléctrico junto a las puertas de las habitaciones, para que los pasajeros los toquen antes de accionar las manijas. La pintura semiconductora del cuadro facilita una descarga lenta, silenciosa e indolora.

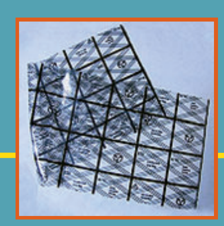
Las hilanderías e industrias con cintas transportadoras aislantes registraban frecuentes casos de molestias y percances ocasionados por la generación de cargas eléctricas, y hoy toman precauciones.

Un ejemplo, en la figura: las galletitas avanzan sobre una cinta de teflón,[2] a la que no se adhiere el chocolate con el que las cubren. Un chorro de aire frío solidifica la cobertura. En la zona **A** las galletitas se separan de la cinta y adquieren carga eléctrica, que transfieren al recipiente metálico **B** adonde caen. La persona que toma ese recipiente queda cargada, y sufre molestias en ese momento, o cuando toca después algo que esté a tierra, por ejemplo otra máquina. La carga opuesta que adquiere la cinta va pasando a tierra a través de la pequeña distancia que la separa del armario metálico **C**. El problema se resolvió, al inicio, con el cambio del recipiente metálico **B** por uno de plástico, y después con el reemplazo de la mesa aislante por otra conductora.[3]



**Acumulación indeseada de cargas**


Los productos antiestáticos evitan que la ropa se adhiera al cuerpo, y hacen que cuelgue con la elegancia de una antigua túnica de lino.


Bolsa antiestática para guardar plaquetas de computadoras y otros circuitos sensibles a las descargas estáticas. Las líneas de pintura conductora impresas hacen que todos los puntos del contenido se encuentren al mismo potencial eléctrico, sin tensión o diferencias de potencial (es el principio de la llamada jaula de Faraday).

## Descargas atmosféricas, pararrayos, descargadores

Desde muy antiguo, y aún hoy, el rayo es la descarga electrostática más dañina para las personas y bienes materiales. Cuando su ocurrencia era imprevisible se le atribuía carácter divino. Tanto en las representaciones del dios romano Júpiter, como en las de su equivalente griego Zeus (de cuyo nombre derivan Deus y Dios) empuñan rayos que representan el merecido castigo del Cielo. Hace un par de siglos la colocación de pararrayos despertaba reservas religiosas en algunas personas muy conservadoras, que ridiculizaron a su inventor, Benjamín Franklin

[2] El teflón es una marca registrada de Dupont para el *politetrafluoretileno*. Ese plástico es aislante, impermeable, inerte y se puede usar entre –270 y 300 °C.

[3] Un supervisor aprendió que si ponía más tensa la cinta (con eso aumentaba su distancia al armario) desaparecían las quejas del personal. Pero como ignoraba los detalles electrostáticos, decía: *"Cuando pongo más tirante la cinta, aquella máquinas dejan de dar corriente."*, y señalaba instalaciones alejadas, contra las que se descargaban los operarios en sus tareas, y que estaban provistas de robustas puestas a tierra, resultado de los reiterados reclamos.

(1706–1790). La Iglesia, sin embargo, jamás objetó la invención, como algunos creen.[4]



Izquierda, un rayo en el mar. Derecha, casa alta de madera protegida con un pararrayos.



En un rayo, el camino de la corriente puede ser ascendente, descendente u oscilante. Sin embargo se dice que caen, porque se los suponía enviados por los dioses de las alturas. En el antiguo vaso griego, Zeus empuña el rayo con el que castiga a los mortales.

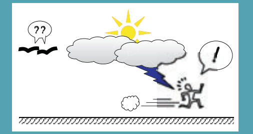
El pararrayos más sencillo es la *punta de Franklin*, una simple barra metálica conectada a tierra con un cable grueso, y puesta encima de un edificio. Cuando se produce la ruidosa descarga, la corriente pasa directamente a tierra por un camino directo, sin que se genere una gran cantidad de calor. En cambio si la descarga ocurre a través de los materiales del edificio, que no son muy conductores, se genera mucho calor. Por ejemplo el agua del tronco de un árbol hierve, y el vapor lo hace estallar.[5]

Durante los siglos XIX y XX se perfeccionó la punta de Franklin, al descubrirse que se podía usar no sólo para disminuir los efectos destructivos de un rayo, sino incluso para evitar su ocurrencia.

Las puntas de los pararrayos, donde se acumulan las cargas y el campo eléctrico es más intenso, facilitan descargas suaves y casi silenciosas, que evitan muchas veces el rayo. En 1925 se empezó a colocarles materiales radiactivos (americio 241, o radio 226) para mejorar la ionización del aire cercano. Pero en 1985 se juzgó que esa ventaja no compensa el riesgo de daño radiológico.

Si bien el pararrayos, en sí, está muy alejado de la gente, y a medio metro de distancia su radiación es insignificante, las personas que comercialicen materiales de demolición se podrían contaminar si manipularan el material sin conocerlo; por eso hoy se desalienta el empleo de pararrayos radiactivos.









Hay pararrayos más complejos, cuyo diseño procura siempre ionizar el aire cercano para facilitar la descarga suave si es posible, o al menos, si fuera violenta, aumentar la probabilidad de que ocurra en ese sitio, y no en edificios cercanos sin protección. Algunos tienen gene-

*Fulminar* es matar o quemar el rayo. Fulminante es el detonador o explosivo sensible a los golpes o a las chispas, cuyo estallido hace que explote el explosivo principal. *Fulminita* es un mineral formado por la fusión de la roca por un rayo. En el lenguaje figurado, fulminante significa súbito.

[4] Franklin, en realidad, no sufrió censura de los conservadores sólo por su pararrayos que eludía supuestos castigos de Dios; sino principalmente por ser contrario a la esclavitud y por contribuir a la independencia de la colonia inglesa de la que surgieron los Estados Unidos de América.

[5] Es correcta la expresión "*¡Y a mí, que me parta un rayo!*", porque los rayos parten verdaderamente los troncos a lo largo, en la dirección de la veta de la madera. Partir es dividir a lo largo; cortar, a lo ancho. (El dicho se usa para quejarse del desprecio inmerecido.)

radores de alta tensión como los chisperos que encienden las cocinas, pero cuando hay tormentas a veces se corta el suministro eléctrico, y esos pararrayos no funcionan justo cuando más se los necesita. Otros aprovechan como energía eléctrica la de la propia descarga en ciernes, y se llaman pararrayos de cebado.

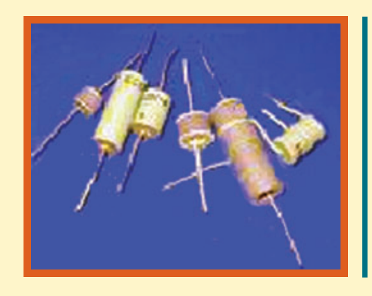
Aun bajo la protección de un pararrayos, cada vez que se produce una descarga atmosférica hay inconvenientes. Además del estampido, que a veces rompe vidrios, aparecen diferencias de potencial entre las partes del edificio que pueden alcanzar valores importantes: a veces se sienten en el cuerpo, o dañan equipos electrónicos. Los aparatos más expuestos son los teléfonos y los módems conectados a las líneas telefónicas. Para reducir esos efectos se colocan en los aparatos electrónicos sensibles unos dispositivos de protección, los *descargadores*, o supresores de picos de tensión. Generalmente se ponen dos, uno entre los cables de alimentación, y otro entre uno de ellos y masa, o sea la carcasa metálica del aparato, si la tuviera. Cuando por efecto de una descarga atmosférica la tensión crece muy por encima de los 220 volt normales, el descargador que, normalmente es aislante, se torna conductor súbitamente, y con eso protege el equipo, aunque a veces haga que se fundan sus fusibles y se los deba reemplazar; eso suele ser más barato que un aparato nuevo.



En las líneas aéreas que transportan energía eléctrica, el cable más alto es el de tierra, que protege los otros de las descargas atmosféricas.

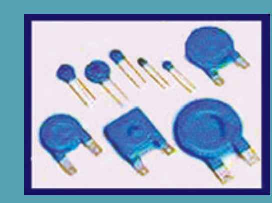


Descargador para línea aérea de energía eléctrica. En inglés los llaman *surge arresters*, y en portugués, *pararraios*.



**Descargadores para aparatos de 220 V. En los de tres patas se conecta el centro a masa, y los extremos a la línea de alimentación.**

Un descargador puede consistir solamente en dos piezas metálicas separadas por una muy pequeña distancia en aire, o una algo mayor en gas a baja presión. Un arrancador de tubo fluorescente, o una lámpara de neón, sirven en algunos casos como descargadores improvisados para proteger aparatos electrónicos contra tensiones excesivas, por ejemplo cuando la alimentación es de 110 V, y el arrancador o la lámpara son de 220 V.



Supresores de sobretensión sólidos, llamados *varistores* (de *variable)* y *capacitor*. Son usuales y baratos.

## Protección de materias inflamables contra descargas de electricidad estática acumulada

La gran cantidad de automotores en circulación hace que existan todavía incendios accidentales originados en chispas eléctricas, a pesar de las precauciones avanzadas que imponen las leyes y reglamentos. Un accidente muy común ocurre

en estaciones de autoservicio, cuando el conductor está llenando el tanque del coche y baja el acompañante para relevarlo en la tarea. Cuando toca el pico de carga o la boca del tanque, salta a veces una chispa que enciende la mezcla de aire y vapores de nafta. Si el pico funciona bien, cortará enseguida el chorro cuando lo suelten; y si el tanque está en buenas condiciones soportará la explosión y sólo dará un soplido; pero esa salida brusca de gas puede dispersar líquido encendido, y causar quemaduras importantes.

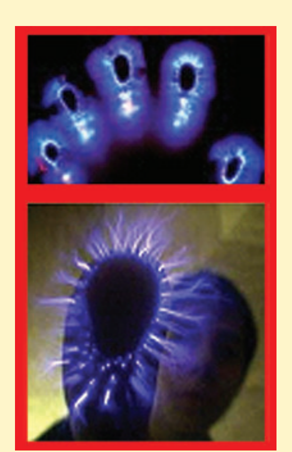
Los camiones que transportan combustible están especialmente protegidos; antes con una cadena de descarga a tierra que colgaba del paragolpes trasero y se arrastraba por el suelo pero, ahora, con neumáticos de goma conductora que impiden que el camión se cargue.




- El uso inexperto de extintores o matafuegos de gas $CO_2$ a veces agrava un incendio, al dispersar el líquido inflamado sin apagarlo. Un efecto menos conocido es que si la persona usa calzado aislante, con la salida del gas adquiere cargas estáticas, que producen chispas y sacudidas cuando después se toca algo que esté a tierra.

## Descargas de electricidad estática en fotografía

Las chispas de las descargas de electricidad estática pueden velar negativos y positivos fotográficos. Actualmente ese percance es poco frecuente, porque las cámaras digitales y las máquinas automáticas de revelado hicieron del laboratorio artesanal una rareza. Sin embargo, algunos, aún lo utilizan por libertad artística, o por gusto. Para evitar el velado por chispas, conviene usar calzado conductor, o pintar el aislante con agua y glicerina. Las casas de artículos fotográficos venden paños, pinzas, guantes y cepillos antiestáticos, o sea hechos de material no totalmente aislante.



Algunos experimentadores producen a propósito esos efectos, con fines artísticos, y los llaman *electrografías*. Una variante que dio lugar a muchos comentarios es la fotografía inventada por el electricista ruso *Semyon Davidovitch Kirlian* a principios del siglo XX, primero con electricidad estática y tensión continua y, después, con tensiones alternas de gran frecuencia, del orden de los cien megahertz.[6] Todavía hay quienes aseguran que el efecto Kirlian revelaría el alma de los seres vivientes, a la que llaman *aura*. Por ejemplo, quitan un pedazo a una hoja de planta y ven que la imagen Kirlian completa el contorno, y cuando la hoja muere, se ve el verdadero contorno. Pero en rigor ese efecto se debe sólo a la humedad de la hoja, y se puede reproducir con un papel común húmedo y seco.



- Copia positiva de una descarga estática registrada directamente en un negativo fotográfico.

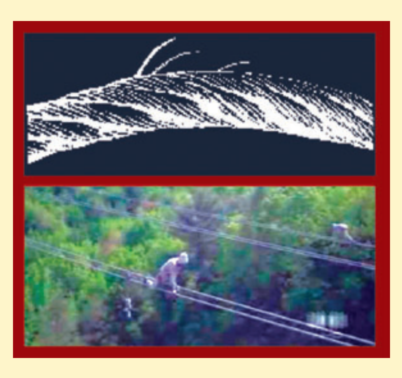
[6] Por un efecto conocido como *pelicular (skin effect)*, cuando la frecuencia es muy alta, la corriente circula por la superficie del cuerpo y no por la masa muscular; entonces no causa molestia.

## Trabajos con líneas vivas

Para poder usar cables no demasiado gruesos, y por eso caros y pesados, desde los lugares de generación hasta los de consumo la energía eléctrica se transmite



con tensiones muy altas, por ejemplo 500.000 volt.[7] Por esas líneas circulan corrientes de hasta 2.500 ampere, y la potencia que transmiten es, en algunos casos, de dos gigavolt, o lo que es equivalente, de unos dos mil millones de kilovolt hora en cada hora transcurrida. El kilovolt hora se vende a unos quince centavos. Entonces, sólo una hora de parada para mantenimiento costaría ¡trescientos millones de pesos!, ocho pesos por habitante.

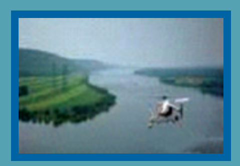


El viento hamaca esos cables, y los deshilacha; por eso hay que examinarlos regularmente para cambiar los tramos dañados. Pero el costo de una parada es enorme, entonces, esos trabajos hay que hacerlos en vivo, con los operarios trepados a los cables a un potencial de medio millón de volts con respecto a tierra, y a treinta metros de altura, la de un edificio de diez pisos, adonde los llevan en helicóptero. Y aquí aparecen inconvenientes electrostáticos.

En el momento en que la persona montada en el helicóptero toca la línea, recibiría una descarga formidable, y no una sola vez, sino cien veces por segundo.

Eso es porque en la Argentina, España y otros países, la polaridad de las líneas cambia cien veces por segundo,[8] y en el mismo intervalo de tiempo, 120 veces en el Brasil, en los Estados Unidos y en otros lugares. Esas descargas producen no sólo sacudidas molestas, sino también riesgos de salud y de vida, y quemaduras.

El procedimiento de rutina que aplican es el de conectar, antes que nada, el helicóptero a la línea de alta tensión, con un cable flexible que termina en una mordaza. Ahora el cable y la nave están al mismo potencial, y la persona puede treparse a la línea.



- Al personal de mantenimiento lo depositan sobre las líneas vivas con la ayuda de helicópteros. Se elige un día de tiempo calmo.

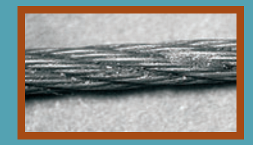
$$U_{\text{máx}} = \sqrt{3}\,U_{\textit{fase-tierra}}$$

$$U_{\text{máx}} = \sqrt{2}\,U_{\textit{eficaz}}$$

- Cuando se dice que una línea es de 500 kV, ése es el valor *eficaz* de la tensión entre dos grupos de cables, o fases. Entre cada fase y tierra hay 289 kV eficaces. Pero el valor *máximo* instantáneo de la tensión entre fases es de 700 kV, y de 408 kV entre fase y tierra, positivos o negativos en cada medio ciclo. (Los capítulos 4 y 5 explican estos conceptos.)

[7] El ritmo con el que se transfiere la energía es la potencia. La potencia eléctrica, en watt, o joule por cada segundo, es igual al producto de la tensión, en volt, por la corriente, en ampere. Para la misma potencia, cuanto más elevada es la tensión, más pequeña resulta la corriente, y por eso más fácil de conducir por cables que no sean demasiado gruesos.

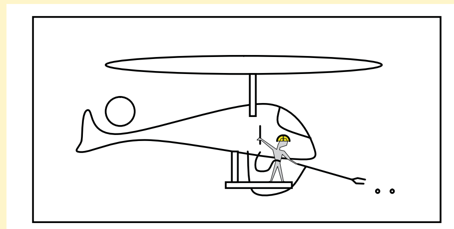
[8] En la Argentina usamos cincuenta hertz, o ciclos por segundo, y cada ciclo completo incluye un cambio de la polaridad de positiva a negativa, y el opuesto de negativa a positiva.

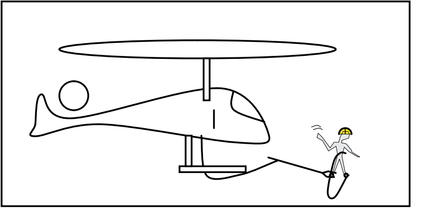


Cable con arena incrustada por el viento. El movimiento flexible hace que cada grano produzca la corrosión del metal.

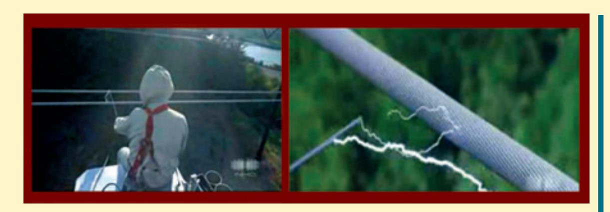


Los lugares donde más se dañan los cables es en la llamada morsetería, o sea en los agarres y empalmes, donde se ponen unas piezas de goma, los amortiguadores, que ayudan a disipar la energía de las oscilaciones inducidas por el viento, y evitan flexiones localizadas muy pronunciadas. Son sin puntas y redondeados, para evitar la ionización del aire, causante de interferencias de radio.





Una vez en ella, pide que se vaya el helicóptero; con ello se desconecta la pinza. En el momento de la conexión y la desconexión se produce un chisporroteo impresionante.



**Cómo treparse a una línea de medio millón de volt sin interrumpir el servicio.**

**La persona viste un traje de tejido conductor conectado al helicóptero que la lleva. Toca la línea con una vara conductora; conecta la nave a la línea con un cable y clips; engancha su arnés de seguridad en la línea, se trepa a ella y desconecta el helicóptero para que se pueda ir. Sin esa maniobra, sufriría quemaduras y sacudidas por las descargas estáticas.**

La tarea es arriesgada, pero brinda, como otras, importantes beneficios a la comunidad. Hace unos años las personas a cargo de esas tareas vestían ropa de aluminio, para que en caso de error de maniobra las chispas no las quemasen. Hoy se usan otros materiales conductores más cómodos, y además porosos para facilitar la transpiración; los tejen con fibras de carbono.

## Efectos en la salud humana (reales y míticos) de la proximidad de cables de alta tensión

En 1996, unos vecinos enardecidos de Ezeiza, en la provincia de Buenos Aires, destruyeron una torre de alta tensión, con la creencia de que su campo produce cáncer.[9] Aún se discute, y en alto nivel, la supuesta influencia de las líneas de alta tensión en la salud de las personas y, quizá nunca se llegue a un despacho indiscutible, por los intereses económicos en juego. Es que esas líneas imponen límites a la altura de las construcciones, con la consiguiente desvalorización del terreno.



**Torre de alta tensión derribada por habitantes del barrio.**

[9] *"Un violento operativo de represión fue desplegado ayer por la Gendarmería Nacional en el partido bonaerense de Ezeiza cuando numerosos vecinos se opusieron a la instalación de torres de alta tensión eléctrica en la zona. Siete personas resultaron heridas y otras cinco arrestadas. (...) Edesur afirmó anoche que: «...no existe antecedente alguno sobre problemas de salud vinculados con redes de transmisión de electricidad»".* (La Nación, Buenos Aires, 6 de marzo de 1996.)

La comunidad científica no halló hasta hoy relación entre enfermedades y esos campos, cuya intensidad es miles de veces menor que cuando nos sacamos una camisa, hablamos por teléfono, usamos un tubo fluorescente o nos secamos el pelo; y más débil que el campo magnético terrestre[10] con el que convivimos desde hace dos millones de años.

A veces se exhiben mapas y estadísticas que muestran una aparente coincidencia entre el trazado de las líneas y casos de cáncer. Pero las líneas eléctricas abundan, justamente, en los lugares poblados, donde hay más cáncer, porque hay más gente.

Es cierto, sin embargo, que los cables afean el paisaje, y que hay países en los que casi no se ven, porque la mayoría son subterráneos. Y cuando las líneas de alta tensión son defectuosas o están faltas de limpieza y mantenimiento, pueden producir interferencias en las comunicaciones, por ejemplo nieve en la TV de aire, o zumbidos en la radio.

La Organización Mundial de la Salud recomienda que la población no se exponga a intensidades de campo eléctrico de más de cinco kilovolt por metro, o diez si es por pocas horas diarias. Y a los portadores de marcapasos les pide que no se expongan nunca a más de cinco kilovolt por metro.



Bola de plasma, que se usa como juguete o adorno, cuyo campo eléctrico en el público excede centenares de veces el de las líneas de alta tensión.

## Propuestas de estudio

**3.1.** La República Argentina utiliza una potencia[11] eléctrica de unos quince gigawatt, o quince mil millones de watt, de los cuales dos gigawatt corresponden a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. La energía de un rayo es de unos 500 megajoule. ¿Cuánto tiempo nos duraría la energía de un rayo, si se la pudiera aprovechar para satisfacer la demanda nacional? (a) Menos de un segundo; (b) entre uno y diez segundos; (c) entre diez segundos y un minuto; (d) entre un minuto y una hora; (e) más de una hora.

**3.2.** Las primeras bombas atómicas disiparon una energía de unos 15 kilotones. Un kilotón equivale al estallido de mil toneladas, o un millón de kilogramos, de explosivo químico trinitrotolueno (TNT). Cada kilogramo de este explosivo libera una energía de mil calorías, o 4,2 millones de joule. En una tormenta se producen unos cuarenta mil rayos de 500 megajoule de energía cada uno. ¿Cuál energía es mayor, la de una antigua bomba atómica, o la de una tormenta eléctrica? (a) La tormenta equivale a diez bombas; (b) la tormenta equivale a tres bombas; (c) la tormenta y la bomba son de energías similares; (d) la bomba disipa tres veces más energía que la tormenta; (e) la bomba equivale a diez tormentas.



La Organización Mundial de la Salud es parte de la Organización de las Naciones Unidas, y tuvo su primera reunión en Ginebra, Suiza, en 1948. La comunidad internacional suele respetar sus recomendaciones.

[10] Los campos magnéticos y electromagnéticos se tratan con más detalle en los capítulos 7, 8 y 9.

[11] La potencia media, en watt, se calcula como el cociente entre la energía transferida, en joule, y el tiempo en el que ocurre esa transferencia, en segundos.



**3.3.** Comenten la presunta eficacia del paraguas con pararrayos incorporado, que algunos usaron a fines del siglo XIX.

**3.4.** Aunque la fórmula exacta para un cable recto está fuera del alcance de este libro, una aproximación gruesa para calcular la intensidad de su campo eléctrico es dividir la tensión por la distancia. La intensidad del campo eléctrico al que está sometida una persona que viva seis metros por abajo de una línea de 13,2 kV ¿excede el límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud?



## Otras fuentes de estudio

Sugerimos buscar en la Red con las palabras electrostática, inconvenientes, cargas estáticas, rayo, descargadores, *fulmini*, *static*, *surge arresters* y *lightning*.

El siguiente enlace contiene muchos datos expuestos por seis especialistas argentinos reunidos en un seminario sobre estructuras de comunicaciones en municipios, realizado en el año 2000 en el Centro Argentino de Ingenieros.

*http://www.cnc.gov.ar/cit/pdf/segmunicipios.pdf*

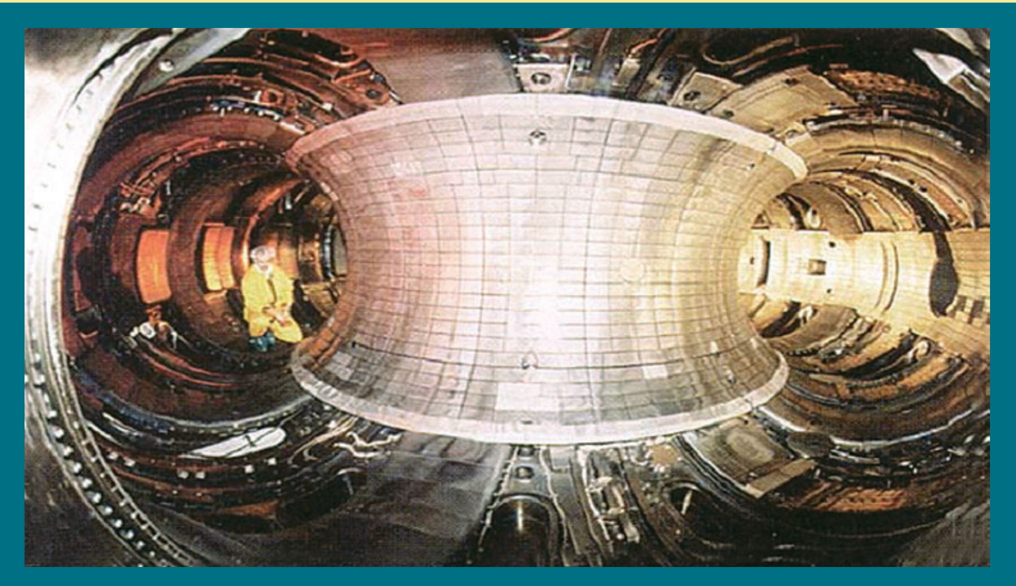


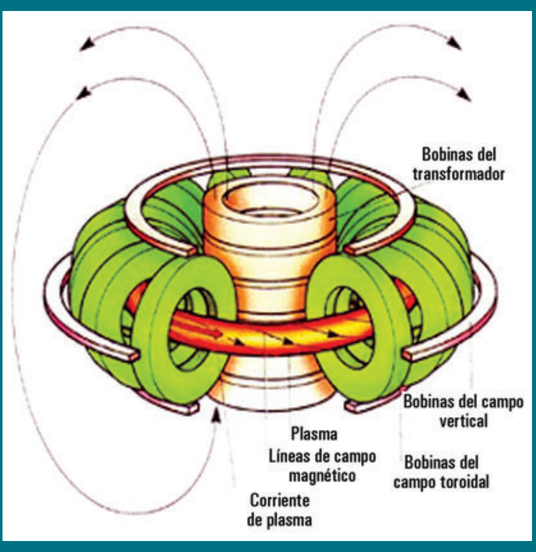

Cañones iónicos para limpieza industrial y neutralización de cargas de superficie. El aire que sopla, cuyos gases han sido ionizados, despega el polvo. Los iones se neutralizan con las cargas opuestas de la superficie contra la que se dirige el chorro de aire comprimido, que hay que proveerle al de arriba, que funciona con 220 volt, pero internamente genera 6.000. El otro anda sin alimentación eléctrica; usa un fuelle mecánico, y genera algunos miles de volt con cristales piezoeléctricos como los de los encendedores.

ELECTRICIDAD

Capítulo 4

# Fundamentos de electrodinámica





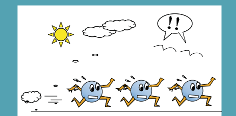

Reactor experimental de fusión en la China, destinado a la obtención de energía eléctrica a partir de una reacción nuclear que transforma hidrógeno en helio. Para mantener en su sitio el chorro de plasma de hidrógeno a cien millones de grados, en rojo en el esquema, por las bobinas circularon doscientos mil ampere durante los tres segundos que duró la primera prueba, en 2006.
Esa clase de reacción nuclear, semejante a la que ocurre en el Sol, no deja residuos peligrosos.

# Fundamentos de electrodinámica

## Corriente eléctrica

La electrodinámica es el estudio de las corrientes eléctricas, o sea el del movimiento de las cargas.

Una corriente es el desplazamiento de cargas de cualquier clase; por ejemplo electrones en un conductor, en un líquido, en un gas o en el vacío, o bien protones en los mismos medios. También son corrientes los movimientos de cualesquiera iones[1] positivos o negativos.




Una corriente de un ampere equivale al pasaje de 6,24150975 trillones de electrones (o bien protones) por segundo.

La corriente eléctrica se mide y expresa en *ampere*. Un ampere es la corriente en la que se transfiere un coulomb por cada segundo que transcurre. Si designamos la carga transferida (en coulomb) con la letra Q, el intervalo de tiempo (en segundos) con Δt, y la corriente (en ampere) con I, tenemos:

$$I = \frac{Q}{\Delta t} \qquad 1A = \frac{1C}{1s}$$

Para la corriente se usa I, porque esa magnitud se llama también *intensidad* de corriente, o intensidad a secas. La letra *A* es el símbolo de la unidad de corriente, el ampere, la *C* lo es de la unidad coulomb de carga,[2] y la letra *s* simboliza el segundo de tiempo. El triángulo o delta mayúscula griega equivale a nuestra *D*, y significa diferencia, variación o intervalo. Un ampere es un coulomb por segundo,[3] y un coulomb, un ampere segundo.

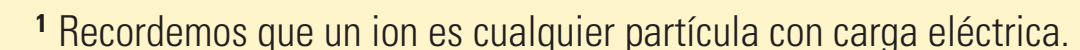


**Algunas corrientes, en ampere**

| | |
|---|---|
| Rayo | 30.000 |
| Central | 20.000 |
| Cables de torre | 1.000 |
| Barrio | 3.000 |
| Edificio | 400 |
| Tostadora | 5 |
| Lámpara | 0,5 |
| Mosquitero | 0,1 |
| Peligrosa | 0,03 |
| Dolorosa | 0,001 |
| Molesta | 0,0001 |
| Nervio | 0,000002 |

## Historia de la corriente

El hombre está familiarizado con las corrientes eléctricas desde la antigüedad más remota, a través de las descargas de electricidad estática acumulada, entre ellas el rayo. Pero los primeras experimentos con corrientes eléctricas estables los hicieron Giuseppe Galvani (1737–1798) y Alessandro Volta (1745–1820).



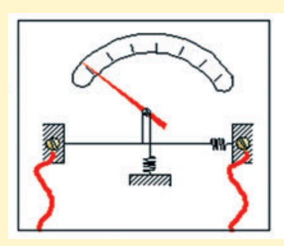
[1] Recordemos que un ion es cualquier partícula con carga eléctrica.

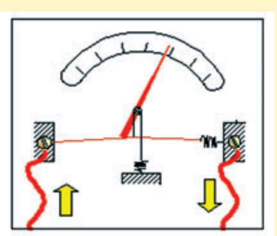
[2] La *C* de coulomb no se debe confundir con la *C* de capacitancia, tratada en el capítulo 1. Puesto que hay más magnitudes y unidades físicas que letras de todos los alfabetos de lenguas vivas y muertas, es inevitable usar la misma letra para cosas diferentes. El contexto permite distinguir los significados sin incurrir en errores.

[3] La palabra *por*, en este caso, significa *por cada*. Algunos, para evitar confusiones, dicen *coulomb* sobre segundo; pero nadie dice, por ejemplo, que paga por un servicio cien pesos sobre mes, o que visita a sus padres una vez sobre semana.

## Medición de corrientes

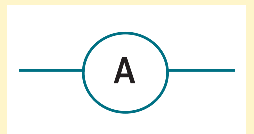
Los instrumentos o aparatos destinados a medir la corriente eléctrica, o sea los que indican cuántos ampere (o fracciones de ampere) circulan por un conductor, se llaman *amperímetros*. También se usan los nombres miliamperímetro, microamperímetro, nanoamperímetro o kiloamperímetro, según la escala o rango de uso de cada uno. Estos aparatos aprovechan algún efecto de la corriente eléctrica, por ejemplo el de hacerle fuerza a un imán,[4] el de calentar el alambre por el que circula, o el de generar una diferencia de potencial, o tensión (en este caso llamada *caída de tensión*), en el conductor por el que circula la corriente; entonces la medición de corriente se realiza en este caso indirectamente, a través de una medición de tensión.





**Amperímetro térmico. Cuando circula corriente por el alambre horizontal, se calienta, se dilata (aumenta su longitud), se afloja y permite que gire la aguja, fija a una rueda pequeña rodeada por un hilo tenso.**

Se desea que el acto de medir altere muy poco la magnitud que se mide. Así pues, un amperímetro debería ser muy parecido a un simple trozo de buen conductor. Para tener presente ese concepto, el símbolo que se emplea para representar un amperímetro es una **A** encerrada en un círculo, del que salen dos conductores gruesos diametralmente opuestos.

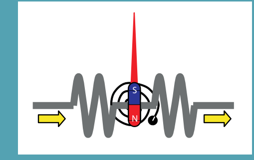



Si por alguna razón se quitase un amperímetro de su sitio, habría que conectar entre sí los cables que había en sus tornillos de conexión, o bornes, para que la corriente pueda seguir circulando con la misma facilidad con que lo hacía a través del instrumento, o mayor. Un buen amperímetro no se debe oponer al paso de la corriente; la resistencia[5] que le opone debe ser mínima.

El cero de un amperímetro puede estar a la izquierda de la escala, o en otro sitio, si se lo usa para medir corrientes de sentidos opuestos.




Amperímetro que indica la carga y descarga de una batería de coche. Tiene una bobina de pocas vueltas de alambre muy grueso de cobre, un imán y un resorte. Según el sentido de la corriente, el imán se inclina hacia un lado o hacia el opuesto. (abajo, el esquema).





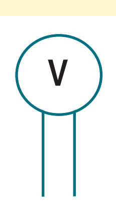
*Shunt* para medir corrientes de centenares de ampere, que pasan por los terminales grandes. Entre los pequeños se produce una caída de algunos milivolt, fáciles de medir.

## Medición de tensiones

Los instrumentos para medir la tensión o diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos se llaman *voltímetros*. Los hay de muy diversos tipos. Los más comunes

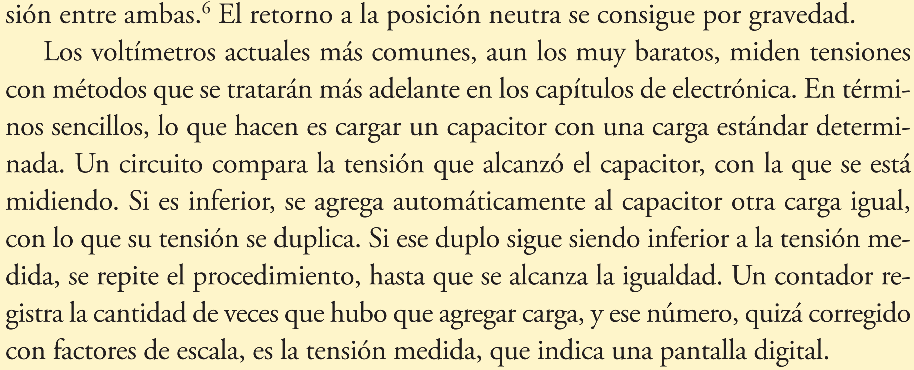
[4] Los efectos magnéticos de las corrientes se estudian en los capítulos 8 y 9; aquí anticipamos una referencia a ese fenómeno.
[5] Enseguida hablaremos con mayor precisión de la resistencia eléctrica.

y antiguos, que todavía se usan, se parecen a los amperímetros, pero en vez de equivaler a un alambre grueso que deja pasar la corriente sin ninguna dificultad, ofrecen, al contrario, mucha resistencia, por lo que las corrientes que los atraviesan son débiles (idealmente nulas), y por eso no alteran mayormente las condiciones de los circuitos o aparatos a los que se conectan. Para reforzar esa idea, se los representa con una **V** encerrada en un círculo, del que salen dos conductores delgados por abajo.




Si por alguna razón se retirase un voltímetro de donde está conectado, simplemente se lo saca, no hay que hacer ninguna conexión como cuando se quita un amperímetro.

Hay voltímetros que realmente no toman ninguna corriente eléctrica, con lo que su presencia no altera en absoluto lo que se mide. Algunos necesitan de pilas, o una alimentación auxiliar. Otros, que hoy son aparatos de museo, no requieren energía extra, por ejemplo el de la figura. Dos piezas conductoras fijas en forma de ocho se conectan a un punto de medición, otra aislada de ellas y de la misma forma es móvil, y resulta atraída por las otras, de acuerdo con la tensión entre ambas.[6] El retorno a la posición neutra se consigue por gravedad.



Los voltímetros actuales más comunes, aun los muy baratos, miden tensiones con métodos que se tratarán más adelante en los capítulos de electrónica. En términos sencillos, lo que hacen es cargar un capacitor con una carga estándar determinada. Un circuito compara la tensión que alcanzó el capacitor, con la que se está midiendo. Si es inferior, se agrega automáticamente al capacitor otra carga igual, con lo que su tensión se duplica. Si ese duplo sigue siendo inferior a la tensión medida, se repite el procedimiento, hasta que se alcanza la igualdad. Un contador registra la cantidad de veces que hubo que agregar carga, y ese número, quizá corregido con factores de escala, es la tensión medida, que indica una pantalla digital.

Un *circuito* es cualquier conjunto de elementos, conectados entre sí, y por los que circula corriente eléctrica.




- Económico *multímetro* digital, que sirve como amperímetro y voltímetro, entre otras funciones. Necesita pilas.



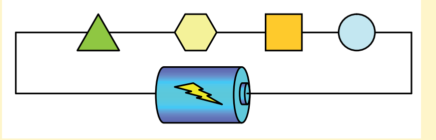
- Multímetro de aguja, o analógico. Cuando se usa como voltímetro o amperímetro, no requiere pilas. Su costo es semejante al de uno digital.

## Conexión en serie

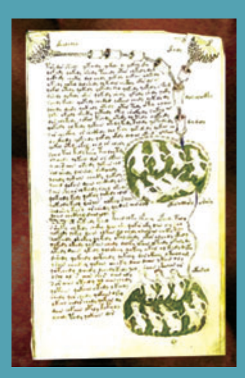
La conexión de la figura se llama *circuito serie*. Por todos los cuerpos pasa la misma corriente. Es la conexión que se usa, por ejemplo, en las guirnaldas de luces

[6] Si hay una tensión, o diferencia de potencial, entre las placas fijas y la móvil, significa que costaría cierto trabajo desplazar una carga de prueba desde una a las otras. Por tanto, entre ellas tiene que existir un campo eléctrico de cierta intensidad. Entonces las cargas de las placas fijas tienen polaridad opuesta a las cargas de la placa móvil. Por lo tanto, se atraen.

de adorno. Si se quema una lámpara de una guirnalda, se apagan todas.[7]

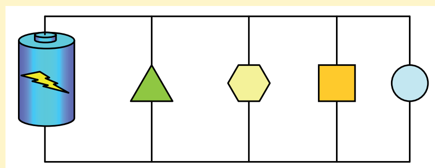


En una conexión en serie la corriente en cada elemento es en cada instante la misma. Las tensiones pueden ser diferentes, pero la suma de las tensiones de todos los elementos conectados en serie a una pila, iguala la tensión de la pila.



## Conexión en paralelo

La figura ilustra un *circuito paralelo*. Es el que se usa en las casas para enchufar los artefactos. Si se apaga uno, los demás siguen funcionando.



En una conexión en paralelo, la tensión en cada elemento es la misma. Las corrientes pueden ser diferentes, pero la suma de las corrientes de todos los elementos conectados en paralelo a una pila, iguala la corriente que suministra la pila.

La conexión en paralelo también se llama *shunt*, derivación, y baipás (o *bypass*).

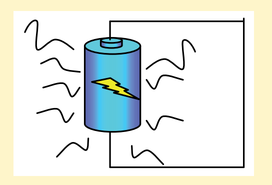
Los circuitos que combinan conexiones en serie y en paralelo se llaman circuitos *serie–paralelo*.

- En el palacio de Salomón (siglo X a.C.) el agua se recogía de los tejados, pasaba por filtros y después por piletas en serie. La que no se usaba había que dejarla correr, para provecho de los demás. Por costumbre hoy seguimos llamando *agua corriente* la que se sirve en paralelo; el agua que no se usa queda encerrada, y no hay que dejarla correr.



## Cortocircuito

Un cortocircuito es la conexión directa del positivo con el negativo de una pila, o entre los contactos de un enchufe.[8] *Cortocircuitar* es poner algo en cortocircuito, y también unir entre sí los bornes de cualquier aparato, aunque no sea una fuente de energía. Por ejemplo, antes de tocar un capacitor conviene cortocircuitarlo, para que se descargue y no nos dé una sacudida.





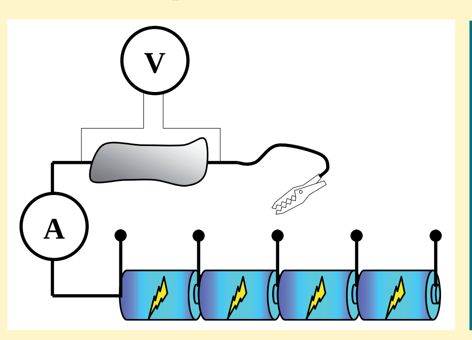
- Baipás quirúrgico, o paso paralelo, en una arteria parcialmente obstruida.

[7] A algunas guirnaldas les ponen, en paralelo con cada lámpara, un *termistor*, componente que se calienta cuando se quema una; con eso disminuye la resistencia que ofrecía al paso de la corriente, y permite que siga circulando, para mantener encendidas las otras lámparas.

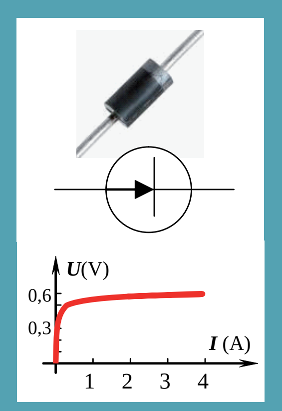
[8] Los cortocircuitos son, en general, indeseables. En ellos las pilas se calientan, y a veces se rompen y dejan salir líquidos corrosivos. En los enchufes y en las baterías de coches pueden haber chispas, fusión de cables e incendio de las vainas aislantes. Para reducir ese riesgo en las instalaciones, en caso de cortocircuito la alimentación se desconecta automáticamente.

# • Ley de Ohm

La *ley de Ohm*, llamada así en homenaje a Georg Simon Ohm (1789-1854), establece que para un cuerpo dado, la corriente y la tensión son directamente proporcionales, o sea que si la tensión en volt aumenta al doble, la corriente en ampere también se duplica.




• **Cada pila tiene una tensión de 1,5 V. Según la posición de la pinza cocodrilo, al cuerpo gris se le aplican 0; 1,5; 3; 4,5 y 6 volt. Si ese cuerpo cumple la ley de Ohm, las corrientes estarán en la misma proporción.**




• Los díodos de silicio, muy usados en electrónica, cuya foto, símbolo y curva de tensión versus corriente muestra la figura, no cumplen la ley de Ohm.

La representación gráfica de la tensión en función de la corriente, o de ésta en función de aquélla, para un cuerpo que satisface la ley de Ohm, es entonces una recta que pasa por el origen. La pendiente de esa recta, o sea la constante de proporcionalidad entre la tensión y la corriente, se llama *resistencia eléctrica*; se designa con ***R*** y se expresa en ohm, cuyo símbolo es la omega griega mayúscula. Tenemos entonces:

$$R = \frac{U}{I} \qquad\qquad 1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

***R*** es la resistencia en ohm; ***U***, la tensión en volt; e ***I***, la corriente en ampere. En el ejemplo del gráfico, cuyos valores están inventados, la resistencia del cuerpo vale 15 ohm.

La ley de Ohm no es una ley de la naturaleza, en el sentido que tiene esa palabra en física. Las leyes se cumplen siempre; en cambio hay cuerpos que no cumplen la ley de Ohm. Se la llama ley por costumbre en el ámbito eléctrico.

La resistencia se puede medir directamente con un óhmetro, o con un multímetro que incluya esa función. Los medidores destinados a medir valores muy altos de resistencia, por ejemplo la de las instalaciones con respecto a tierra, se llaman megóhmetros, gigóhmetros y teróhmetros.[9]



• Megóhmetro para comprobar la aislación de instalaciones. La manivela acciona un generador que provee 500, 1.000 ó 1.500 V, a elección.

[9] Los prefijos mega, giga y tera significan, respectivamente, millón, mil millones y billón.

## Resistencia, conductancia, resistividad y conductividad

La inversa de la resistencia se llama conductancia; se designa con la letra ***G***, y se expresa en siemens,[10] en homenaje a Werner von Siemens (1816–1892), investigador eléctrico y fundador de la empresa Siemens & Halske en Alemania.

$$G = \frac{1}{R} \qquad G = \frac{I}{U} \qquad 1S = \frac{1A}{1V}$$

Mientras que la resistencia eléctrica es una propiedad de un *cuerpo*, la resistividad es una propiedad de un *material*. Es como ocurre con el peso y el peso específico; por eso a la resistividad se la llama también resistencia específica.[11] Por ejemplo, se puede hablar de la *resistencia* del cuerpo humano entre las manos y los pies, la de un alambre de cobre de cierto diámetro y longitud; la de un amperímetro; la de un voltímetro, y la de una línea eléctrica. En cambio, hablamos de la *resistividad* del cobre, la del aluminio, la del tejido muscular humano, la de la tierra seca, y la húmeda. La relación entre la resistencia y la resistividad para un alambre de cierto material, es la siguiente:

$$R = \rho \, \frac{L}{S}$$

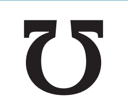
***R*** es la resistencia, en ohm, del alambre; ***L*** su longitud en metros; la letra griega ro minúscula $\rho$, que corresponde a la ***r*** de nuestro alfabeto latino, representa la resistividad del material, y se expresa en Ω.m, también en Ω.cm, o por comodidad en algunos casos, en $\Omega.mm^2.m^{-1}$, que se lee: ohm milímetro cuadrado sobre metro. ***S*** es la sección transversal del alambre, en metros cuadrados.

En el ambiente electromecánico, la conductividad del cobre y otros metales se suele expresar en IACS. Cien IACS equivalen a 58 millones de siemens/metro, y es la conductividad de un cobre de buena calidad eléctrica. La sigla significa *international annealed copper standard*, norma internacional de cobre recocido. Por ejemplo, un alambre trafilado[12] de buen cobre de un metro de longitud y un milímetro cuadrado se sección, tiene una conductividad de cien IACS, ó $58 \times 10^6$ S/m, una resistividad de 0,01724 $\Omega.\ mm^2.m^{-1}$, una resistencia de 0,017241 Ω y una conductancia de $58 \times 10^6$ S.

[10] Escribimos el nombre de la unidad siemens con minúscula, porque es un sustantivo común; en cambio su símbolo es la S mayúscula, como el de todas las unidades cuyos nombres provienen del de personas. Así, los símbolos de metro, segundo y kilogramo son m, s y kg; en cambio los de volt, ampere, ohm y siemens son V, A, Ω y S.

[11] *Específico* significa concerniente o relativo a la especie.

[12] *Trafilar*, (de *a través* e *hilo)* es pasar un material por un agujero para hacer una barra o un alambre, como cuando se hacen churros de masa.



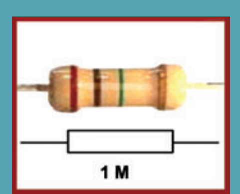
- Antiguamente, la unidad de conductancia, en vez del siemens, era el *mho*, ohm al revés, y se la representaba con una omega griega mayúscula invertida. Los tipógrafos pusieron, con toda razón, el grito en el cielo, y se cambió mho por siemens.



- **Algunas resistividades, en ohm metro.**

| | |
|---|---|
| Plata | $1{,}59.10^{-8}$ |
| Cobre | $1{,}72.10^{-8}$ |
| Aluminio | $2{,}65.10^{-8}$ |
| Hierro | $9{,}71.10^{-8}$ |
| Estaño | $1{,}20.10^{-7}$ |
| Agua de mar | 0,2 |
| Carbón | 50 |
| Agua potable | 200 |
| Agua pura | 100.000 |
| Baquelita | $10^{10}$ |
| Madera seca | $10^{-11}$ |
| Mica | $10^{-13}$ |
| Aire | $3.10^{13}$ |
| Vidrio | $10^{-4}$ |
| Polietileno | $10^{14}$ |

# Tensión, corriente, resistencia y potencia




Un elemento cuya única función es la de oponer resistencia al paso de la corriente se llama *resistor* (también se los llama *resistencias*). En la figura, uno de un megohm, y su símbolo. La línea marrón representa la primera cifra, un uno; la negra la segunda, un cero; y la verde, un factor de diez a la quinta. La línea dorada significa un cinco por ciento de tolerancia.

**Código de colores para resistores.**

| | | |
|---|---|---|
| Negro | 0 | |
| Marrón | 1 | |
| Rojo | 2 | |
| Anaranjado | 3 | |
| Amarillo | 4 | |
| Verde | 5 | |
| Azul | 6 | |
| Violeta | 7 | |
| Gris | 8 | |
| Blanco | 9 | |
| Dorado | ± 5% | |
| Plateado | ± 10% | |
| Sin banda | ± 20% | |

La precisiones mejores que el cinco por ciento, se indican con números impresos.

De la mecánica recordamos seguramente el concepto de *potencia*, magnitud física dada por el cociente entre la energía transferida en un cierto lapso, y el valor de ese tiempo. Por ejemplo, si se entregan 3.600 joule de energía en un tiempo de una hora, la potencia vale 3.600 J/h, o bien, si convertimos la hora en segundos, (3.600 J) / (3.600 s), o sea un J/s, un watt.

En el capítulo 1 interpretamos la tensión, o diferencia de potencial eléctrico, ***U***, como cociente entre energía y carga, en J/C, o volt. Por otra parte, la corriente ***I*** es el cociente entre la carga y el tiempo, en C/s, o ampere.[13] Entonces, del producto o multiplicación de la tensión por la corriente, resulta la *potencia eléctrica*:

$$U = \frac{Energía}{Q} \qquad I = \frac{Q}{\Delta t} \qquad UI = \frac{Energía\,Q}{Q\Delta t}$$

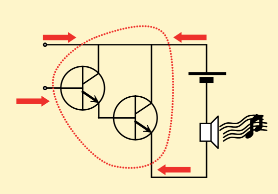
$$UI = \frac{Energía}{\Delta t} \qquad \boxed{P = UI} \qquad 1\,W = 1\,V\,1\,A$$

Por ejemplo, si por una lámpara conectada a la red eléctrica domiciliaria de 220 V circula una corriente de 0,182 A, la potencia desarrollada es de 40 W, puesto que 40 W = 0,182 A × 220 V.

Si aparte de lo dicho tenemos en cuenta que la tensión y la corriente se relacionan con la resistencia mediante la ley de Ohm, $\boldsymbol{R = U/I}$, podemos expresar la potencia no sólo como el producto de la tensión por la corriente, sino también en función de la resistencia eléctrica. Resulta $\boldsymbol{P = U^2/R}$, o bien $\boldsymbol{P = I^2.R}$.

# Primera ley de Kirchhoff

Esta ley, llamada así en honor del científico prusiano Gustav Kirchhoff (1824–1887), establece que en cualquier parte de un circuito, la suma de las corrientes que entran es igual a la suma de las corrientes que salen; o lo que es lo mismo, y si consideramos positivas las corrientes entrantes y negativas las salientes, la *suma algebraica de las corrientes es nula*. Por ejemplo, y sin necesidad de entender cómo funciona



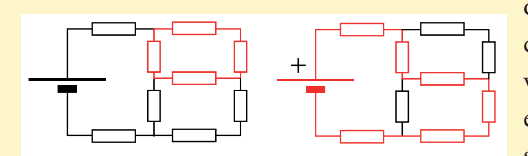
[13] J simboliza la unidad joule de energía; C, la unidad coulomb de carga; s, la unidad segundo de tiempo, y W es el símbolo de la unidad watt de potencia.

el circuito de la figura, las corrientes de los cuatro cables que entran a la zona punteada, suman cero. En particular, la línea punteada podría rodear sólo un punto de conexiones sin componentes; dicho punto es un *nodo* del circuito.

En el esquema, al menos una de las cuatro flechas tiene el sentido errado, puesto que si todas las corrientes fueran entrantes como se muestra, no podrían sumar cero.

## Segunda ley de Kirchhoff

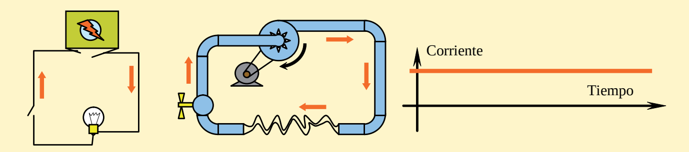
La segunda ley de Kirchhoff dice que la suma algebraica de todas las tensiones de una *malla* siempre suman cero. Se llama malla de un circuito cualquier camino que parta de un punto, pase por conductores y componentes, y vuelva al mismo punto. Por ejemplo, en el circuito de la figura, que representa una pila conectada a un conjunto de nueve resistores en serie - paralelo, se indican en color dos de las seis mallas imaginables. En cualquiera de ellas la suma de tensiones vale cero.[14]




## Corriente continua y alterna

Las pilas proveen una tensión aproximadamente constante, y siempre de la misma polaridad; son de *tensión continua*, y la corriente con la que la pila alimenta los circuitos es también continua. En cambio la red domiciliaria de energía eléctrica provee *tensión alterna*, o alternada.[15]

Para comprender la diferencia entre la corriente continua y la alterna, recurrimos a un *modelo hidráulico*, en el que la corriente eléctrica se compara con la circulación de agua, y la tensión, con una diferencia de presión del líquido.




La corriente continua de una pila se asemeja a la circulación de agua en sentido constante, impulsada por una turbina rotativa. La alterna de la red es como agua

[14] Cuando al recorrer la malla se pasa por una pila de – a +, la tensión se considera positiva. En los componentes pasivos, y en el mismo sentido del recorrido, las tensiones son negativas; se las llama *caídas* de tensión.

[15] En el capítulo siguiente se explican las ventajas de la corriente alterna, con respecto a la continua que se usó hasta mediados del siglo pasado.

$R_1$ $R_2$ $R_3$

$R = R_1 + R_2 + R_3$

$G_1$ $G_2$ $G_3$

$G = G_1 + G_2 + G_3$

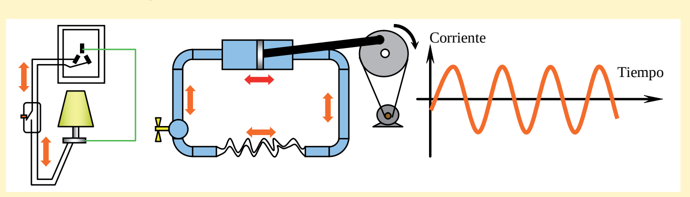
- Los resistores en serie equivalen a un solo resistor cuya resistencia sea igual a la suma de las resistencias individuales. En los conectados en paralelo, las que se suman son las conductancias, o sea las inversas de las resistencias.



- En la mayoría de los coches, el polo negativo de la batería se conecta al chasis, o masa. En la red eléctrica domiciliaria va a tierra uno de los dos cables de alimentación, que se llama el *neutro*, porque su tensión con respecto a tierra es nula o muy pequeña. El otro es el *vivo*.

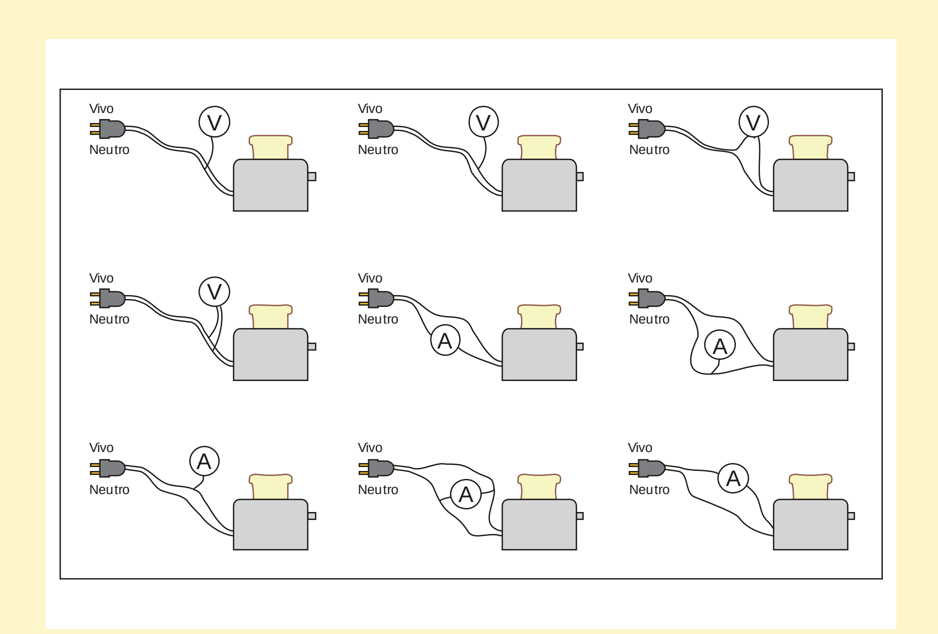
que circula en sentido cambiante, impulsada por una bomba alternativa.

Naturalmente, y como en todas las comparaciones, ésta tiene sus límites; por ejemplo dos corrientes de agua no se atraen, como sí lo hacen dos corrientes eléctricas.




## Propuestas de estudio

**4.1.** ¿Cuáles de las siguientes conexiones sirven para medir la tensión aplicada a una tostadora, cuáles para medir la corriente que toma de la línea de alimentación, y cuál produce un cortocircuito?




**4.2.** ¿Qué potencia se desarrollaría en una persona que, por accidente, tomase contacto entre el vivo de la línea de alimentación de 220 V y tierra? ¿Y si el contacto accidental fuera con una línea de 7.620 V? (la resistencia del cuerpo es cercana a los 50.000 ohm).

**4.3.** ¿Qué resistencia tiene un calefón eléctrico de 3 kW y 220 V? ¿Cuánto vale la corriente?

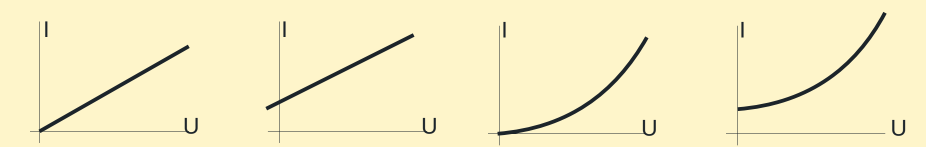


- Supuestos beneficios de las corrientes eléctricas, según creencias del siglo XIX. A la dama le aplican algunas decenas de voltios entre el cuello y los pies.



- El sitio http://blog.makezine.com/archive/2006/04/5.html describe cómo construir una poderosa batería eléctrica con cinco kilogramos de papas y algunos clavos.

**4.4.** ¿Cuál de estos gráficos representa mejor la ley de Ohm?




**4.5.** Se suele oír de periodistas, y hasta de funcionarios, frases como: "*Los que consuman menos de 400 kilowatt por bimestre no sufrirán aumentos de tarifas*", o *"Se están consumiendo más kilowatt por hora"*. Analicen el acierto o error de semejantes expresiones.

## Otras fuentes

Sugerimos buscar en la Red con las palabras electrodinámica, electricidad y Tokamak.[16] En *http://www.sapiens.itgo.com/ documents/doc12.htm* muestran distintos tipos de voltímetros y amperímetros, y sus principios de funcionamiento.

[16] La palabra Tokamak es un acrónimo de тороидальная камера с магнитными катушками , *toroidal'naya kamera s magnitnymi katushkami*, en ruso cámara toroidal con bobinas magnéticas. Toroidal significa con forma de toro, cuerpo geométrico semejante a una cámara inflada, cuyo nombre proviene de una variante mexicana del juego del sapo de nuestro campo, que consistía en arrojar unas rosquillas de tela para ensartarlas en los cuernos de una cabeza de toro embalsamada.

# Aplicaciones de la corriente eléctrica



● Aunque todavía decimos *la luz* cuando nos referimos a la energía eléctrica, hoy se usa más para producir calor, frío, energía mecánica y transformaciones químicas.

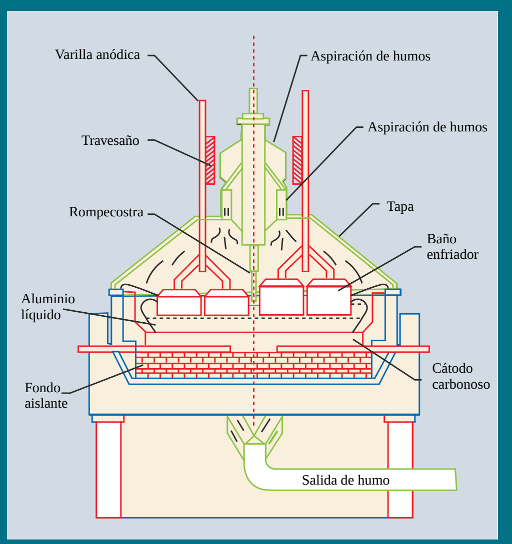
● Horno para fundir metales. Sus tres barras de grafito, alimentadas con electricidad trifásica, tocan inicialmente el mineral. En cuanto establecen contacto, se separan un poco para mantener la chispa, igual que cuando se suelda con electrodos, pero con una potencia treinta mil veces mayor.



● Aluar (Aluminio Argentino) fabrica el metal con energía eléctrica de la central hídrica Futaleufú, a 650 kilómetros de distancia, que le llega por una línea de alta tensión provista casi especialmente para esa industria.

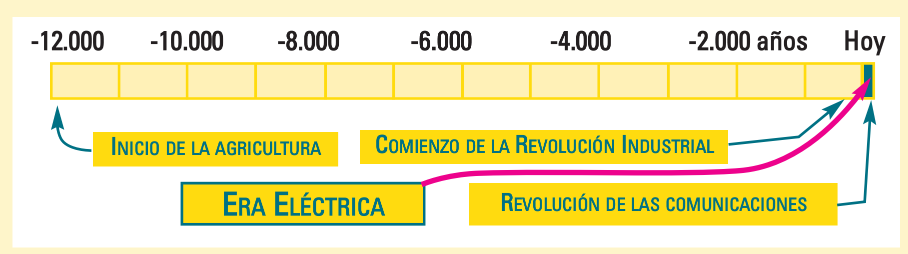
Futaleufú desarrolla casi medio gigawatt de punta, y entrega a Aluar 2.500 gigawatt hora por año, que la fábrica usa para descomponer el mineral aluminita con el paso de corriente eléctrica.





# Aplicaciones de la corriente eléctrica

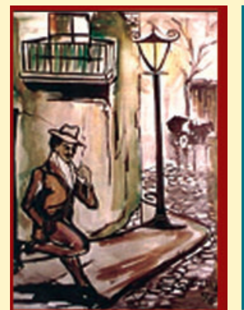
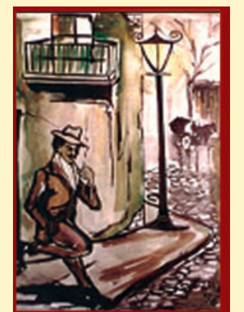
Hace un siglo el uso de la energía eléctrica era casi inexistente; en cambio hoy dependemos por completo de ella. Su interrupción causa grandes trastornos: quedamos a oscuras o encerrados en el ascensor, se paralizan las industrias, los subtes se detienen en los túneles, los trenes quedan varados y la gente debe descolgarse de los estribos, el tránsito sin semáforos resulta un caos, los cines cancelan sus funciones y devuelven el importe de las entradas, y las cintas de las líneas de hornos se detienen llenas de galletitas que se tuestan hasta incendiarse.




● Cuatro hechos centrales en la historia de la humanidad, cada uno de los cuales permitió un gran aumento de la población.



● Iluminación de emergencia con celulares.

● Compadrito de 1900, junto a un farol de arco voltaico.

Pero casi todos aceptamos muy conformes esa dependencia, igual que la del agua potable, las vacunas y los teléfonos, porque nos brindan más libertad y una mejor calidad de vida

En nuestro país la energía eléctrica se comenzó a distribuir a fines del siglo XIX; hace más de un siglo, y se usaba casi exclusivamente para la iluminación. Los primeros faroles eléctricos, los *arcos voltaicos* instalados en la Plaza de Mayo y algunas avenidas de Buenos Aires tenían electrodos de carbón entre los que se mantenían chispas encendidas, facilitadas por la tensión continua con la que se alimentaban; como en las máquinas de soldadura de arco de hoy.

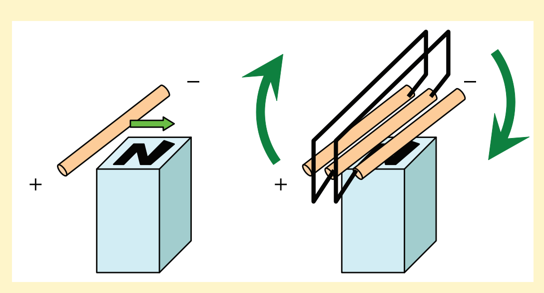
Había entonces un solo generador eléctrico, ubicado en el Puerto, impulsado por una máquina de vapor que quemaba carbón.



● Arco voltaico. El camino de la chispa se curva por el ascenso de los gases calientes, menos densos que el aire que los rodea. De ahí proviene la palabra *arco* para designar una chispa eléctrica.

## Generación de energía eléctrica

Lo que llamamos generación es, en realidad, una transformación, porque se genera energía eléctrica a partir de otra forma de energía, como la nuclear, la hídrica, la térmica,[1] la solar y la mareomotriz, entre muchas otras. Nuestro país usa la térmica y la hídrica, y también aprovecha la energía nuclear.




Si se mueve un conductor eléctrico (por ejemplo un alambre de cobre) frente a un imán, entre los extremos del conductor aparece una tensión eléctrica. Si en vez de un solo conductor se ponen varios en serie, los efectos se suman (esos alambres dispuestos en serie forman una bobina). Lo mismo sucede si se deja el conductor quieto y se desplaza el imán. En esto consiste el principio de funcionamiento de la mayoría de los generadores eléctricos.

Actualmente hay sólo una forma de generación de energía eléctrica de importancia práctica, que es la de hacer girar una máquina que hace pasar imanes (o electroimanes) frente a bobinas fijas arrolladas alrededor de grandes trozos de hierro.

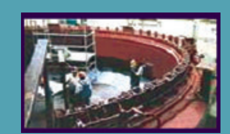
Muchas centrales de energía (hídricas, térmicas y nucleares, entre otras) generan electricidad con esas máquinas rotativas, llamadas generadores, y muy parecidas a los motores; de hecho podrían funcionar como tales; pero en vez de recibir energía eléctrica y entregar energía mecánica como los motores, reciben energía mecánica y suministran electricidad.

Los generadores de las centrales se parecen a un alternador de coche, que impulsa el motor del vehículo para cargar las baterías. Pero en el caso de la generación industrial no hay baterías grandes que se puedan cargar; la energía producida se debe consumir en el instante en que se produce. Sería grandioso poder almacenar la energía cuando hay mucha y sobra; pero eso aún no se consiguió a gran escala.

En nuestro país la tensión domiciliaria es de 220 volt y 50 hertz, o ciclos por segundo.



La mano impulsa una rueda de imanes que pasan frente a una bobina, y generan en ella una tensión eléctrica que enciende las lámparas de la linterna, o carga sus pilas. Otras linternas de esa clase se agitan, para que se mueva un imán dentro de una bobina, y se genere también energía eléctrica.



Parte fija, o *estator*, del generador de una central. Aún no colocaron el rotor.

[1] La denominación *térmica* no es del todo clara, porque también la energía nuclear genera vapor, y la solar calienta agua y produce vapor en ciertos casos en los que la conversión es indirecta. Todas esas formas de generación eléctrica son, en definitiva, también térmicas. Pero por costumbre, esta palabra se usa sólo para la energía proveniente de la quema de combustibles.

## Origen de la energía eléctrica




Hoy las fuentes de energía eléctrica se clasifican, quizá de manera no muy clara, en *convencionales*[2] y *alternativas*. Se consideran convencionales la térmica, la hídrica y la nuclear. Y alternativas, la solar, fotovoltaica, eólica, mareomotriz, geotérmica y tidal,

**HÍDRICAS.** Estas centrales aprovechan las diferencias de nivel del terreno por donde pasan ríos. Se embalsa el agua, y se la deja caer a través de turbinas, que hacen girar alternadores de cuarenta metros de diámetro. Son muy limpias, requieren poco mantenimiento y no hay gastos de combustibles. Pero a veces alteran mucho el paisaje, y hasta el clima local, y cuando escasean las lluvias, también falta la energía.

**TÉRMICAS.** En estas centrales de generación se queman combustibles, y con el calor de combustión se hace hervir agua, cuyo vapor impulsa turbinas y alternadores. Son muy útiles en países que tienen mucho combustible, como los Estados Unidos de América, donde prácticamente viven sobre un gigantesco yacimiento de carbón que les durará siglos. Pero producen gases que recalientan la atmósfera. En los últimos dos siglos esos gases aumentaron al triple del valor normal, y se temen cambios climáticos desfavorables en todo el mundo.[3]



- La chimenea mayor no echa casi humo porque quema bien; pero despide gases que recalientan la atmósfera. Las torres bajas son enfriadoras y sólo despiden vapor de agua. Sin embargo en el cine y la TV a veces las presentan, injustamente, como símbolos de la contaminación.

**NUCLEARES.** Son las centrales más baratas y limpias; no generan gases, y sus insumos (llamados combustibles aunque no se quemen) son abundantes. Por desgracia, los residuos requieren almacenamiento especial, y sirven para fabricar armas. El 70 % de la energía que usa Francia proviene de centrales nucleares; nosotros usamos sólo un 15 % de ese origen.

**GEOTÉRMICAS.** Aprovechan el calor interno de la Tierra. Tienen la ventaja de que no liberan gases, pero no hay muchas fuentes termales útiles; se aprovechan las pocas que existen.



- Hermoso parque de generación eólica en Copenhague, Dinamarca. En el mar abierto hay viento más intenso y uniforme que en tierra. Sus veinte generadores desarrollan 40 MW en conjunto. (Diez veces menos que la central argentina de Futaleufú, o la de Atucha.)

**EÓLICAS.** Usan la energía del viento para impulsar generadores. Son útiles en regiones de pocos habitantes y donde hay mucho viento. Un solo molino puede alimentar un pequeño poblado; pero para una gran ciudad harían falta miles de molinos, y no habría dónde ponerlos.

**SOLARES TÉRMICAS.** Concentran los rayos del Sol con espejos para hervir agua en calderas, cuyo vapor impulsa turbinas, las que a su vez hacen girar alternadores.

**SOLARES FOTOVOLTAICAS.** Estas centrales convierten directamente la radiación

[2] Lo que en un momento histórico se considera alternativo, con el avance tecnológico puede pasar a ser algo convencional.

[3] En la Argentina también la generación de energía eléctrica se basa principalmente en la quema de combustibles, en nuestro caso el gas natural nacional, y el importado de Bolivia.

solar en electricidad. Podemos ver esos paneles en las autopistas, donde cargan las baterías de los teléfonos de emergencia[4] para que funcionen aunque se interrumpa el servicio eléctrico. Los paneles tienen bajo rendimiento, y ocupan mucho lugar, pero son muy limpios.

**TIDALES, O DE MAREAS.** Son centrales hidroeléctricas que aprovechan los desniveles producidos por las mareas. Sólo sirven en lugares costeros donde ese efecto sea importante; además la geografía debe ser apropiada para embalsar el agua cuando sube, para usarla después.

## Transmisión, o transporte, de la energía eléctrica

Por razones de aislación eléctrica en el espacio disponible, los alternadores de las centrales generan energía eléctrica de una tensión cercana a los 20 kilovolt, con los que se alimenta un transformador que eleva la tensión a 500 kilovolt. Con esa tensión, y a medida que se la va generando, la energía se *transmite*, o *transporta*, a lugares distantes, a veces a países vecinos. Se usa una tensión muy alta para que, a igual potencia, la corriente sea pequeña[5]; entonces los conductores pueden ser delgados, livianos y baratos, aunque los aisladores deban tener una mayor longitud. La posibilidad de generar energía en un sitio y consumirla en otro hace que se aprovechen mejor los recursos; por ejemplo se pude vender energía cuando sobra, y comprarla cuando falta. Cuando los horarios pico de consumo no son simultáneos entre regiones apartadas en longitud geográfica, entonces la transmisión permite aprovechar una central para abastecer dos zonas en diferentes horarios.

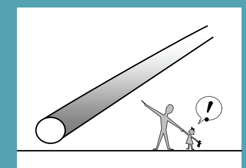


**Torres de 500.000 volt que soportan seis cables (dos líneas trifásicas). A unos metros del suelo a veces ponen garfios para que los niños no trepen y sufran daños.**



Estación repetidora de señales de satélite, ubicada en un descampado carente de líneas eléctricas. El sistema funciona con la electricidad generada por dos paneles solares fotovoltaicos.

La etapa siguiente a la generación y transmisión es la *distribución* de la energía eléctrica, que se hace a través de transformadores que reducen la tensión de 500 kV a una más baja de 13,2 ó 33 kV, con la que se recorren barrios y suburbios. Sigue por último el *consumo*. En cada manzana o edificio importante, o en cada barrio suburbano pequeño, un transformador reduce aún más la tensión, a los 220 V y 380 V de las viviendas e industrias.



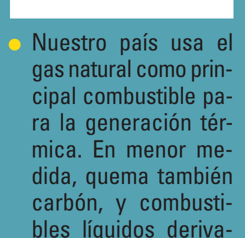

Si pretendiéramos transmitir la energía con una tensión de sólo 220 V, la corriente sería tan alta, que para construir las líneas eléctricas no alcanzaría todo el cobre del mundo.

[4] La utilidad de esas líneas disminuyó con el auge de la telefonía celular.
[5] Recordemos que la potencia eléctrica, en watt, es igual al producto de la tensión, en volt, por la corriente, en ampere.

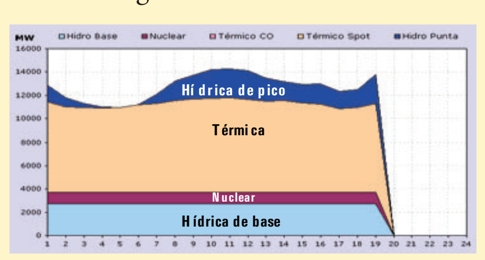
# • Administración de la energía eléctrica

Hay un organismo[6] que decide, bajo la autoridad política, cómo se reparte la energía; a quiénes privan de ella cuando no alcanza porque llueve poco; cuánta se compra o se vende; si el agua embalsada se guarda más tiempo o en cambio se la hace pasar de inmediato por las turbinas; qué se hace cuando sobra energía que nadie compra; qué máquinas se detienen en ese caso, o en qué embalse se deja escapar el agua sin turbinarla.

La información se publica en internet, donde se puede consultar cuánta potencia genera cada central, cuáles fueron sus desperfectos si los hubo, y cuánto vale la energía hora a hora.



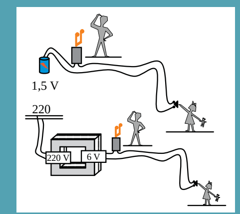

• Nuestro país usa el gas natural como principal combustible para la generación térmica. En menor medida, quema también carbón, y combustibles líquidos derivados del petróleo.




• ***Generación del primero de agosto de 2007, informada hasta las 19.*** **La potencia de origen térmico, parte de la hídrica (en celeste, llamada de base) y la nuclear son casi constantes a lo largo del día; en cambio la hídrica de punta es variable y responde a las demandas diferentes en cada horario. A las cuatro de la mañana el consumo es mínimo.**

# • Ventajas de la corriente alterna

Hasta 1940 la energía eléctrica se distribuía con tensión continua, lo que facilitaba el funcionamiento del alumbrado público con arcos voltaicos. Pero por la misma razón por la que se mantenían los arcos luminosos, en los cortocircuitos accidentales también se mantenían las chispas; que caminaban por los cables y causaban incendios. En cambio la tensión alterna, que se distribuyó al principio junto con la continua, se interrumpe cien veces por segundo[7] en nuestro país, y 120 en algunos otros; así, en cada interrupción se apagan los posibles arcos. Otra ventaja de la tensión alterna es que se la puede elevar y reducir con transformadores, que no funcionan con tensión continua.




• Los 220 V serían peligrosos para los timbres, porque afuera a veces llueve; por eso funcionan con menor tensión. En 1930 andaban a pila; hoy, gracias a la alterna, usamos transformadores de 220 a 6 V.

*«Cuando estén secas las pilas, de todos los timbres, que vos apretás...»* Metáfora del abandono en el tango *Yira, yira*, de Enrique Santos Discépolo, 1930

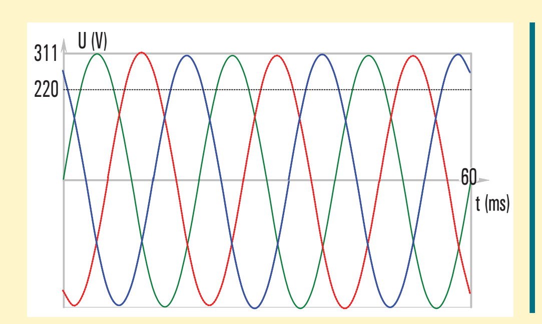
# • Sistema trifásico de distribución industrial y domiciliaria

Con el doble fin de ahorrar cobre y de facilitar el funcionamiento de los mo-

[6] Esa institución es el Sistema Argentino de Interconexión, SADI, que maneja una empresa privada de servicio público, Cammesa: Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico, Sociedad Anónima.

[7] La corriente se interrumpe dos veces en cada ciclo; cuando aumenta y pasa por cero, y cuando disminuye y pasa por cero.

tores, la distribución de energía eléctrica en edificios y pequeños comercios e industrias se hace con cuatro cables, llamados el neutro, y las fases 1, 2 y 3 (o R, S y T). Entre el neutro y una fase hay 220 V; entre dos fases, 380 V. A cada vivienda pequeña se le da el neutro[8] y una fase.[9] Popularmente el suministro monofásico, el de una sola fase y el neutro, se llama luz; y el trifásico, de tres fases y el neutro, *fuerza motriz*, o *fuerza*, porque se usa para alimentar motores grandes.




**Las tensiones alternas de la distribución trifásica no varían simultáneamente en el tiempo, sino que cada una de ellas está atrasada o adelantada un tercio de ciclo con respecto a las tensiones de otras dos fases; eso es útil para el funcionamiento de los motores. La tensión máxima instantánea es de 311 V. Los 220 V son la tensión eficaz, o sea la de una tensión continua del mismo efecto energético.**



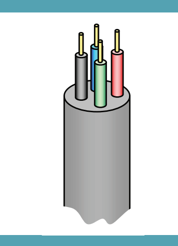
Emblema del Sindicato Luz y Fuerza, de los trabajadores de los servicios eléctricos. El nombre alude a la energía eléctrica monofásica y trifásica, pero también, y con algo de poesía, a la verdad, y a la fortaleza sindical.

Hay países que, como el nuestro, usan 220 V y 50 Hz; por ejemplo Alemania, Dinamarca, España, Francia, Italia, Reino Unido, Paraguay, Uruguay y Chile. Los Estados Unidos usan 120 V y 60 Hz, como el Brasil, Canadá, Cuba, México y Venezuela, entre otros. Los fabricantes de artefactos tienen eso en cuenta para que se puedan enchufar en cualquier sitio con sólo correr una llave, y a veces aun sin eso.

Cuando por una falla falta una fase, los motores vibran, hacen menos fuerza y se recalientan. Normalmente hay dispositivos de protección, llamados guardamotores, que cortan la alimentación eléctrica en ese caso.

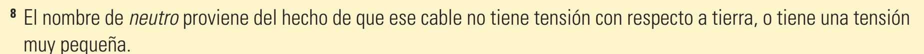
## Vivo y neutro

En una instalación domiciliaria los tomacorrientes tienen –o deberían tener[10]– tres contactos: tierra, vivo y neutro. Si descalzos y parados sobre un suelo húmedo tocáramos el vivo, sufriríamos una sacudida eléctrica peligrosa, mortal a veces. En cambio nada sucede si tocamos tierra o el neutro. Eso ocurre porque la compañía conecta a propósito uno de los cables a tierra, con una barra enterrada que llaman



CABLE DE NEUTRO Y TRES FASES. LAS TENSIONES SON:

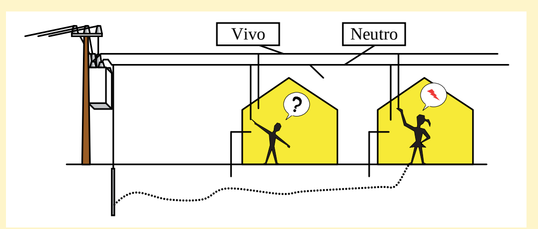
| | |
|---|---|
| negro-azul: | 220 V |
| negro-rojo: | 220 V |
| negro-verde: | 220 V |
| rojo-azul: | 380 V |
| verde-rojo: | 380 V |
| azul-verde: | 380 V |



[8] El nombre de *neutro* proviene del hecho de que ese cable no tiene tensión con respecto a tierra, o tiene una tensión muy pequeña.

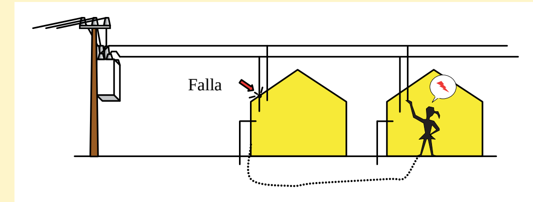
[9] Por error de traducción de las palabras *phase* y *face*, a veces se confunde fase con faz, interfase con interfaz, fases con faces e interfaces con interfases.

[10] Los adaptadores de tres patas a dos, que venden en comercios y en la calle, permiten conectar un artefacto nuevo a una instalación vieja, y viceversa; pero anulan la protección de tierra, por eso su uso y venta están prohibidos. Pero son preferibles a las conexiones improvisadas que haría el público si no los pudiese conseguir. Quizás eso explique el escaso celo para hacer cumplir ese reglamento; seguramente se prefiere la conciencia al castigo.



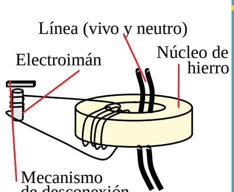

jabalina. Pero ¿por qué hay un vivo y un neutro? Si la compañía no conectara ningún cable a tierra, ¿no nos salvaríamos, acaso, de descargas molestas y peligrosas?

La respuesta es negativa. Supongamos que así lo hicieren, y que nada conectasen a tierra. Pero una falla en una de las miles de viviendas en el barrio haría que un cable de energía se vincule a tierra, y exponga con eso a los demás a que sufran descargas cuando tocan el otro conductor. Como las fallas son inevitables, la compañía eléctrica decide evitar efectos erráticos y sorpresivos con una conexión definitiva que hace que los percances de un usuario no dependan del estado de la instalación de otro.










- El disyuntor diferencial actúa cuando la corriente que recorre el conductor vivo es diferente de la que pasa por el neutro. Cuando eso ocurre es que hay una fuga a tierra, posiblemente a través de una persona, que con este aparato se salva de recibir corriente durante mucho tiempo. La instalación tiene que estar en perfecto estado. El botón azul comprueba su funcionamiento, con una diferencia de corriente de 30 miliampere.

## Sistemas aislados de alta seguridad

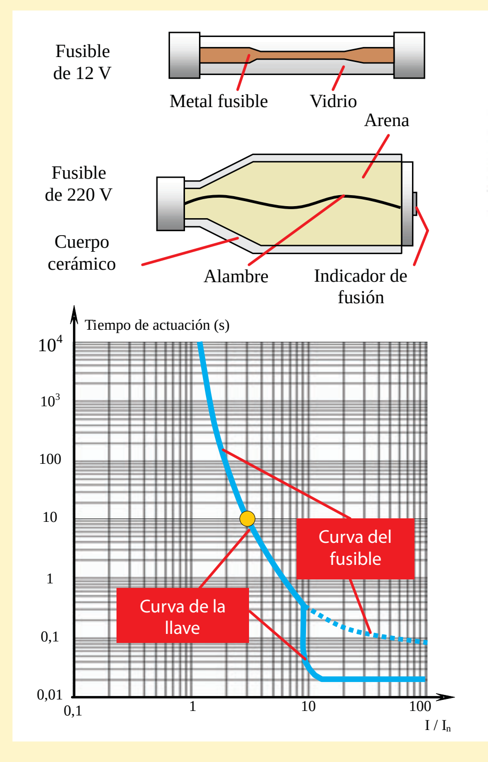
En quirófanos y otros ambientes de seguridad, ponen transformadores de 220 a 220 V, para aislar de tierra los dos conductores de la instalación. Así nadie sufre una sacudida, cualquiera sea el cable que toque, mientras sea sólo uno y no exista ninguna otra falla.[11]

Cada vez se populariza más la instalación de *disyuntores diferenciales*. Disyuntor significa que desconecta; diferencial, que lo hace cuando hay diferencia entre las dos corrientes que lo atraviesan, la del neutro y la del vivo.

## Fusibles e interruptores termomagnéticos

Las corriente excesiva que circula por los cables de una instalación, debida a que hay demasiadas cosas enchufadas, o a un cortocircuito accidental, puede producir incendios, humos tóxicos, o fundir los cables dentro de las paredes, con graves daños personales y materiales. Para evitarlo, se intercalan fusibles y *llaves termomagnéticas*.

[11] Esos sistemas de alimentación sólo se deben usar cuando hay un buen servicio de mantenimiento. De otro modo, si en un aparato se dañase la aislación con respecto a tierra, y si no se lo reparase de inmediato, se perdería la ventaja original, y surgirían percances al azar, según se encienda o no el equipo defectuoso.






Cuanto más se excede la corriente normal, más rápidamente actúa un fusible. Por ejemplo, y como lo indica el punto rojo, si circula el triple de la corriente normal, se funde en diez segundos.

Las llaves termomagnéticas tienen la ventaja de que en caso de cortocircuito, interrumpen la corriente de inmediato, sin la demora de un fusible.



- Cortocircuito deliberado producido en una instalación, para estudiar sus efectos destructivos el caso de que no actúen las protecciones. El fuego debe salir hacia arriba y no quemar ningún maniquí testigo.

## • Efectos de la corriente eléctrica en el cuerpo humano

Raramente percibimos una corriente de 50 μA. Un miliampere nos da una sacudida alarmante; diez miliampere producen movimientos incontrolados; treinta miliampere, si persisten durante un segundo o más, pueden paralizar los músculos respiratorios. Las corrientes mayores pueden paralizar el corazón.

En la Argentina mueren más de dos mil personas por año en accidentes eléctricos. Los especialistas recomiendan, en caso de desvanecimiento, comprobar si la víctima respira, y en ese caso no hacer nada hasta la llegada de auxilio médico. Si no respira, pero tiene pulso, hay que darle respiración boca a boca.

Si además de no respirar, la víctima tiene el corazón paralizado, hay que hacerle respiración boca a boca y a la vez masaje cardíaco.[12] La figura de la página siguiente indica las maniobras de auxilio para esos casos.



- Un caracol pintado en un fusible indica que es de actuación lenta, apropiada para el arranque de un motor. Un rayo identifica un fusible rápido, para equipos electrónicos. (La tortuga y la liebre de nuestra fábula latina son íconos menos interpretados en el ambiente eléctrico internacional.)

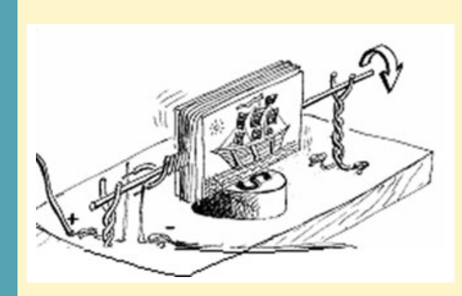
[12] Los médicos que actúan en emergencias aseguran que quienes están en el lugar del accidente, aunque sus conocimientos sean infinitamente menores que los de los especialistas, tienen en cambio la gran ventaja de poder actuar al instante y sin demoras; de ahí la conveniencia de conocer los rudimentos de la atención de víctimas de choques eléctricos que parezcan muertas, pero que tengan apenas una parálisis respiratoria momentánea de la que se puedan recuperar con ayuda.




## Propuestas de estudio

**5.1.** ¿Cuál de los cuatro cables de la página 59 es el neutro?

**5.2.** Busquen en diarios o Internet ejemplos de usos correctos e incorrectos de las expresiones kilowatt y kilowatt hora.



**5.3.** Construyan un motor experimental, por ejemplo el de la figura, hecho con una pila, un imán y un alambre aislado enrollado alrededor de una caja de fósforos.

**5.4.** Aluar gasta 14 megawatt hora por cada tonelada de aluminio que produce. ¿Cuánto aluminio fabrica anualmente con los 2.500 gigawatt hora por año que recibe de Futaleufú?

**5.5.** ¿A cuántos megawatt equivale un gigawatt hora por año?

**5.6.** A quince centavos el kilowatt hora ¿cuánto dinero se pierde por cada hora que deje de funcionar una línea de 500 kV y 1.000 A? (La potencia trifásica se calcula como $P = \sqrt{3}\ U.I$)

**5.7.** Consideren las ventajas e inconvenientes de los 220 V en las casas argentinas, comparados con los 120 V de otros países.



Símbolos internacionales de peligro eléctrico, útiles porque muchos no leen las advertencias, o perciben mejor las figuras que el texto.



El mundo de noche. Se combinaron artísticamente fotos reales tomadas en momentos diferentes, de noche local, y sin nubes (podría haber algo de trampa). Las zonas más luminosas son las de más población y desarrollo.



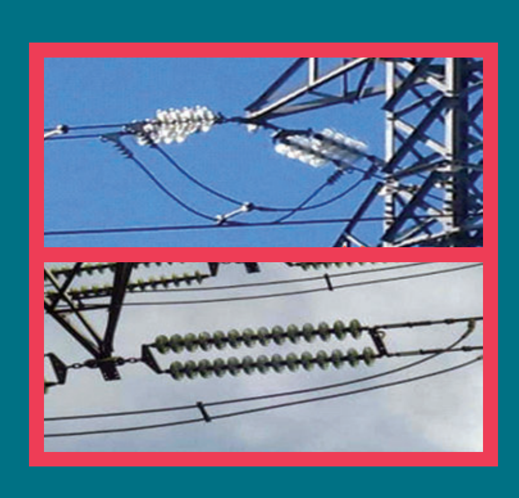
## Otras fuentes

Sugerimos buscar en la Red con las palabras Cammesa, generación, distribución, energía eléctrica, vivo, neutro, RCP (reanimación cardiopulmonar), CPR (*cardiopulmonary resuscitation*) , Cátedra de Física del CBC UBA; como ejemplo de expresión errónea, “kilowatt por hora”; y acertada, “kilowatt hora por bimestre”.

ELECTRICIDAD

Capítulo 6

# Materiales eléctricos







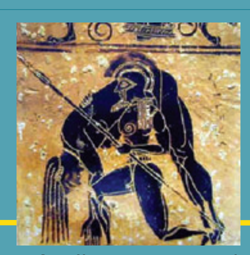
● Los plásticos, popularizados a partir de 1930, revolucionaron la producción, especialmente, la de la industria eléctrica.

***Izquierda arriba:*** antiguos aisladores de metal y discos de vidrio, o de porcelana esmaltada, que todavía se usan, enganchados en cadena. Cada disco soporta 10.000 V.

***Izquierda abajo:*** detalle de los eslabones de las cadenas.

***Derecha arriba:*** otros, enterizos, hechos con barras macizas de plástico reforzado con fibra de vidrio (como el de las garrochas y cañas de pescar), enfundados en goma de silicona. Pesan diez veces menos, son más baratos, cumplen la misma función y, si se caen, no se rompen. Cada centímetro soporta 10.000 V.

# Materiales eléctricos



Aquiles carga el cuerpo de Patroclo, empuña su lanza de bronce y jura vengarse. (Escena de *la Ilíada*, siglo VIII aC.) El bronce es una aleación de cobre y estaño. Abajo, otro uso bélico del metal: balas de fusil con vainas de bronce y cabezas de plomo cubiertas de cobre.

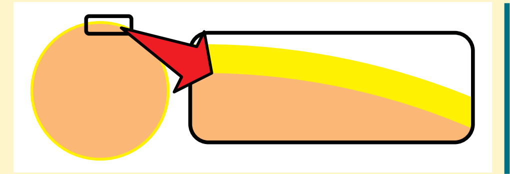


La industria eléctrica necesita conductores, aislantes y semiconductores.[1] Los materiales conductores más usados, actualmente, son el cobre y el aluminio.

## Cobre



El cobre siempre tuvo un gran valor estratégico, desde la antigüedad, cuando se lo usaba, aleado con estaño, en la fabricación de ollas, arados, lanzas y flechas (después, balas de fusil). Este metal se encuentra, a veces, en estado puro o nativo en la naturaleza, y más comúnmente en forma de óxidos y sales. Hoy, sigue siendo muy apreciado, pero no tanto para la guerra; se usa mucho más en la industria eléctrica. Después de la plata, el cobre es el metal que mejor conduce la electricidad. Se lo puede trafilar fácilmente, es decir, convertirlo en hilos delgados.



**Corte transversal de un delgado alambre de audífono, de unos cien micrones de diámetro (una décima de milímetro). Sus tres micrones de barniz aislante soportan una tensión de hasta mil volt.**

El cobre se suelda con facilidad[2] y hace buen contacto cuando se lo aprieta. Pero no resiste bien la intemperie. El ambiente industrial y los gases de escape de los coches, en las ciudades y cercanías de rutas, atacan su superficie.



Cúpula de cobre del Congreso de la Nación. La pátina de óxido, carbonato y sulfato protege el resto del metal.

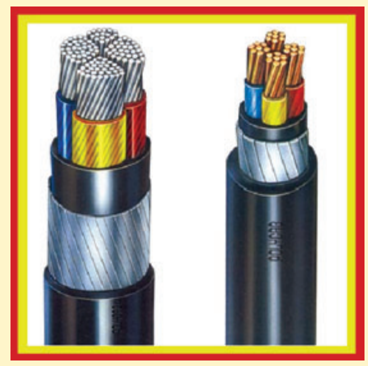
## Aluminio

Este metal es más reciente en la historia; se lo obtuvo por primera vez en 1825.

[1] La palabra *semiconductor* tiene, en este capítulo de electricidad, el significado de un material de propiedades intermedias entre las de conducir y aislar. En el ambiente electrónico, en cambio, reciben ese nombre ciertos cristales que son, normalmente, aislantes, pero que se vuelven conductores cuando se les aplica una señal eléctrica en un electrodo de control, o cuando reciben algún otro estímulo, como la luz o radiaciones.

[2] Hay alambre esmaltado, llamado *autosoldable*, que se puede soldar sin necesidad de rasparle el esmalte aislante, el cual actúa como fundente y facilita la unión.

Resiste mejor los agentes climáticos; pero su conductividad eléctrica alcanza sólo el 60 por ciento de la del cobre. Sin embargo, su densidad es tres veces menor. Entonces, aunque para la misma corriente los cables de aluminio deban ser más gruesos, resultan más livianos que los de cobre. Eso es importante en las líneas de transmisión eléctrica, porque las torres y los aisladores no tienen que soportar tanto peso como lo requeriría el cobre. En cambio, en los conductores envainados, el aluminio es poco ventajoso, porque encarece la aislación, que tiene que ser de mayor diámetro.



El aluminio vale hoy tres dólares el kilogramo, mientras que el cobre cuesta cuatro. Por volumen, el precio de esos dos metales es de 9 y 36 dólares por litro.

La buena resistencia a la corrosión del aluminio se debe a que se le forma, naturalmente, una capa de óxido muy delgada y transparente, de apenas unas diez moléculas de espesor. Esa capa se reconstituye de inmediato donde se daña. Aún así, la atmósfera de las ciudades la ataca, por lo que se aplica, a veces, un procedimiento llamado *anodizado*,[3] que genera una capa de óxido de espesor tres mil veces mayor, unos 30 micrones y, a veces, cien micrones en el llamado anodizado duro.

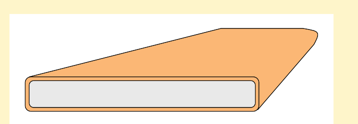
Esa capa protectora tiene, por desdicha, un gran inconveniente eléctrico: dificulta el contacto. Cuando en las instalaciones eléctricas se usa aluminio, hay que hacer los empalmes con una grasa especial que disuelve la capa de óxido, inhibe su formación y protege el metal de la atmósfera. De otro modo, la unión se calentaría anormalmente, y se fundiría.



- La capa de óxido de aluminio que resulta del anodizado es porosa; por eso acepta bien las tintas.
La pieza de apariencia natural en la figura, también fue anodizada.

## Conductores compuestos

Un material conductor que reúne las ventajas del aluminio y del cobre, resultado de una útil variante del trafilado, está compuesto de aluminio en la mayor parte del volumen, pero con una delgada capa de cobre por afuera. Las barras compuestas se pueden empalmar como si fueran de cobre, pero pesan –y cuestan– poco más que las de aluminio.



Los siguientes datos ayudan a decidir en qué casos conviene usar uno u otro



- Distintas formas de barras de aluminio recubiertas de cobre, destinadas a la conducción de la corriente eléctrica.
En edificios grandes, conviene hacer la alimentación eléctrica con barras y no con cables, demasiado gruesos y difíciles de manejar.

[3] Anodizar una pieza es sumergirla en una solución química, conectarla al polo positivo y hacerle circular corriente para que se le forme una capa protectora, por ejemplo, de un metal resistente a la oxidación. En el caso del aluminio la solución es de ácido sulfúrico, y la capa que se le forma es de un óxido de ese metal. Se hace circular un ampere por cada decímetro cuadrado de superficie, hasta que la pieza se torne bastante aislante. El negativo se conecta a un cátodo de plomo, también sumergido.

material con fines eléctricos. Por ejemplo, el oro conduce mejor que el aluminio, y peor que el cobre; y es, por mucho, el más caro de esos metales. Pero resiste tanto la corrosión, que se lo prefiere para fabricar los electrodos de las pantallas de cristal líquido, o LCD, y para bañar los contactos de las plaquetas de las computadoras, porque en esas aplicaciones su utilidad es mucho mayor que el costo, dado que se lo emplea en muy pequeña cantidad.



- Para obtener nitrógeno líquido, se comprime el aire de la atmósfera con compresores, se espera a que se enfríe, y si la compresión fue suficiente, ya con eso, el aire queda líquido. Cuando se libera la presión, el aire comienza a hervir, pero se lo puede conservar líquido durante muchas horas en un termo.
Lo primero que se separa es el nitrógeno, que hierve a 77 K; después lo hace el oxígeno, a 90 K.

| METAL | DENSIDAD kg/dm³ | PRECIO DÓLARES/kg | CONDUCTIVIDAD S/m |
|---|---|---|---|
| plata | 10,5 | 160 | $0{,}630 \times 10^8$ |
| cobre | 8,9 | 4 | $0{,}580 \times 10^8$ |
| oro | 19,3 | 25.000 | $0{,}452 \times 10^8$ |
| aluminio | 2,7 | 3 | $0{,}377 \times 10^8$ |
| hierro | 7,8 | 1,6 | $9{,}90 \times 10^8$ |

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$G = \gamma \frac{A}{L}$$

Junto a la tabla, recordamos la fórmula que da la resistencia $R$, en ohm, de un conductor de resistividad ρ (en Ω.m), longitud $L$ (en metros) y sección transversal $A$ (en m²).

Abajo, su recíproca, que da la conductancia $G$ de ese mismo conductor, en siemen (S), en función de los mismos datos y de su conductividad, γ (en S/m). La conductividad es la inversa de la resistividad, y S = 1/Ω.

Por ejemplo, un alambre de cobre de un metro de longitud y un milímetro cuadrado de sección, tiene una resistencia eléctrica $R$ = 0,017 Ω, y una conductancia $G$ = 58 S. Si es de aluminio, su resistencia es de 0,026 Ω, y su conductancia, de 38 S.



- El paciente en estudio pasa por la bobina superconductora del tomógrafo, que genera en su cuerpo un intenso (pero inofensivo) campo magnético, con el que se estudian sus órganos y tejidos.

## Superconductores de alta temperatura

La superconducción, o superconductividad, y una de sus consecuencias, la levitación magnética, fueron descubiertas en 1911 por el físico holandés H. K. Onnes, premio Nobel de Física en 1913. El investigador notó, entre otros notables efectos,[4] que el mercurio y el plomo se convierten en conductores perfectos, cuando su temperatura es menor de cuatro grados Kelvin, o 269 grados centígrados bajo cero. La resistencia eléctrica del material se anula por completo y una corriente eléctrica que estuviera circulando, se mantiene, indefinidamente, y sin gasto de energía. El plomo y el mercurio son superconductores de *baja* temperatura.

[4] Otro efecto de las temperaturas muy bajas es la *superfluidez* del helio líquido que, a tres grados Kelvin, pierde por completo su viscosidad. Cuando se lo deja de agitar, en vez de detenerse, al rato, como lo hacen los demás líquidos, se mantiene en movimiento.

En 1986 K. A. Müller y J. G. Bednorz desarrollaron materiales que presentan superconductividad a temperaturas superiores a los 77 K y recibieron, por eso, el premio Nobel de Física de 1987. La receta para fabricarlos resultó tan sencilla después del descubrimiento, que la hija de uno de ellos la puso en práctica en una feria escolar de ciencias. Esos materiales, de la familia de los cerámicos, se conocen como YBCO, en inglés óxidos de itrio, bario y cobre, y son superconductores de alta temperatura. Aquí *alta* significa 195 grados bajo cero,[5] que es la temperatura de ebullición del nitrógeno a la presión normal. Ese gas es el más abundante del aire.

La explicación de la superconductividad se basa en la física cuántica y es algo complejo, especialmente, la de alta temperatura.



● ***Levitación magnética.*** **Un imán permanece suspendido sobre un material superconductor enfriado con nitrógeno líquido, y viceversa.**

Hay variadas aplicaciones de los superconductores. Se los usa en trenes de alta velocidad, que levitan sin rozamiento sobre rieles magnéticos. En algunos tomógrafos computados, en hospitales, se hacen circular, por superconductores, corrientes eléctricas muy grandes, que generan campos magnéticos intensos, necesarios para el análisis por resonancia magnética nuclear.[6] Los reactores de fusión nuclear, hoy todavía experimentales, emplean superconductores para las grandes corrientes que generan el campo magnético que mantiene el plasma en su sitio. Se usan, también, en el Gran Chocador de Hadrones, en Suiza, donde forman parte de los electroimanes que hacen girar en círculos las partículas aceleradas. Algunas estaciones de telefonía celular emplean superconductores en sus generadores de microondas, y se los usa también en memorias de computadoras de alta velocidad.

Quizá la energía de las centrales eléctricas se transmita, algún día, por superconductores de temperatura ambiente, si su existencia fuera posible.

## Semiconductores

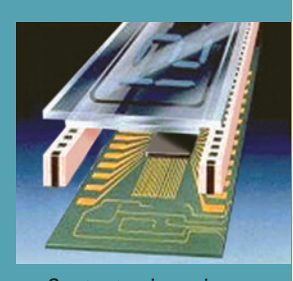
A veces hay que conducir, lo mejor posible, la electricidad; y, en otros casos, se trata, al contrario, de aislarla cuanto se pueda. Para eso se necesitan materiales de elevada conductividad y de gran resistividad, respectivamente.



● Cuando se aprietan las teclas, los puntos negros (de goma conductora) unen los contactos de cobre del circuito impreso.

[5] Los grados de temperatura de la escala centígrada se indican con el símbolo °C; los de la escala Kelvin o absoluta, con la letra K, sin el círculo elevado. La temperatura de 0 °C equivale a 273,16 K.

[6] En capítulos siguientes se trata el tema con mayor detalle.



Contacto ingenioso. La unión eléctrica entre los contactos de oro de la pantalla de cristal líquido y el circuito impreso de cobre, se hace a presión, a través de tiras de goma aislante con segmentos conductores intercalados.
En vez de oro se usan, también, compuestos conductores transparentes de estaño y de indio.

Pero, también, son útiles los materiales de condición intermedia entre la conducción y la aislación, sea porque deban tener cierta resistencia eléctrica para la función que cumplen o, simplemente, porque son baratos y no se necesita una conductividad mayor.

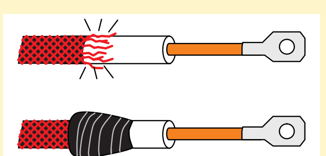
El cable de media tensión de la figura tiene un alma conductora de 19 alambres de cobre estañado, un aislante de polietileno amarillo, una envoltura de tierra de papel metálico, una malla protectora de acero y una funda de plástico rojo. Pero, entre el cobre y el aislante hay unas capas negras de un plástico semiconductor, cuya función es la de evitar que dentro del cable quede aire sometido a un campo eléctrico intenso, porque haría chispas que en pocos años destruirían la aislación.[7]



En este caso no se buscó, especialmente, que esas envolturas fuesen semiconductoras; servirían, igualmente, si condujesen tanto como un metal.

Los teclados de controles remotos y computadoras, suelen tener contactos de goma semiconductora, pero si la goma fuera muy conductora, serviría igualmente. De hecho, la hacen todo lo conductiva que pueden.

En otros casos se necesita, en cambio, que el material tenga cierta resistencia. Por ejemplo, para pintar las líneas calefactoras en la luneta trasera de los coches, que evitan la condensación de humedad, se usa una pintura de polvo de cobre que conduce bastante menos que un cable del mismo material.[8]



Otro ejemplo en el que la conducción parcial es útil, es el de los terminales de media y alta tensión, en los que no alcanza con pelar el cable, simplemente. Donde termina la malla de tierra hay que arrollar cinta semiconductora en forma de cono, para repartir el efecto de borde y evitar chispas.[9]

## Aislantes orgánicos e inorgánicos

Por su relación con los organismos vivientes y la antigua creencia de que sólo

[7] Ese efecto de chisporroteo débil pero, permanente, se conoce como descargas parciales. Se las estudia –y se las trata de evitar– desde hace sesenta años. En un cable se admiten *descargas parciales* de hasta cinco picocoulomb.

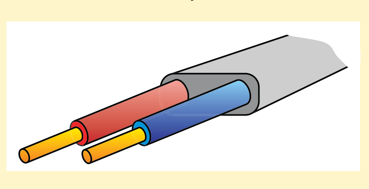
[8] Recordemos que la potencia eléctrica, en watt, se calcula como $P = U^2/R$, donde $U$ es la tensión en volt, y $R$ la resistencia, en ohm. La tensión de la batería de un coche es de 12 V; si se quiere una potencia de calefacción de 36 W, la resistencia de calefacción tiene que ser de 4 Ω.

[9] La subestación transformadora Azopardo, que abastecía a más de un millón de habitantes en Buenos Aires, quedó destruida por completo en 1999, tres meses después de su inauguración. Se ha especulado que el siniestro se pudo deber a una confusión entre la cinta aislante y la conductora, usadas para empalmar cables de 132 kV.

ellos los podían producir, hoy se llaman materiales *orgánicos* los compuestos del carbono en general, con excepción de los carburos, los carbonatos y los óxidos. Por similitud de las uniones químicas, se incluyen entre los materiales orgánicos los compuestos del silicio del mismo tipo.

Por ejemplo, la glucosa, la celulosa, el polietileno, el ácido acético y la goma de silicona son materias orgánicas. En cambio el vidrio, el cuarzo, la cerámica, el aire y la vidia (carburo de tungsteno, titanio y molibdeno) son materiales inorgánicos, aunque algunos de ellos contengan carbono, o silicio.

En toda época, se usaron aislantes de las dos categorías, por ejemplo, cinta aisladora de tela de algodón impregnada en caucho natural, o gutapercha, que todavía se vende, y alambres de cobre estañados y aislados en goma y tela, encerados para que resbalen dentro de los caños. Para usarlos bajo los rayos del Sol, sin que se degradasen, se los cubría con plomo.[10] Si hoy pedimos en una casa de electricidad cordón *símil plomo*, nos darán uno de apariencia idéntica a la del antiguo, pero, de plástico gris, estable ante la radiación solar. Esa clase de instalación, tan precaria, hoy está en desuso, y prohibida.



En media y alta tensión, los aislantes tradicionales eran inorgánicos: la porcelana y el vidrio, que todavía se usan. Hace 60 años no había otros materiales confiables, que sólo se pudieron desarrollar después de terminada la Segunda Guerra Mundial.



• Aislador inorgánico roto, de porcelana blanca esmaltada

La porcelana es un material *cerámico*, es decir, que resulta de la cocción de tierras. Se fabrica con una arcilla muy fina y blanca, el *caolín*, con la que se hace barro, se le da forma, se lo seca y se lo cuece a temperaturas superiores a los mil grados. Cuando está bien hecha resulta compacta y sin poros, pero la porcelana igualmente se esmalta para su uso eléctrico. El color más común para los aisladores es el marrón oscuro, porque oculta las imperfecciones; por eso los más exigentes prefieren el blanco,[11] o el gris, para que se note menos en el paisaje.

En la fabricación de aisladores eléctricos se tiende a un uso cada vez mayor de materiales orgánicos, muchos de ellos de invención reciente. Sigue un conjunto de términos técnicos relacionados con esa rama de la industria.





• La artista plástica Marta Minujin, y una de sus curiosas esculturas de yeso. La palabra plástico significa relacionado con las formas.

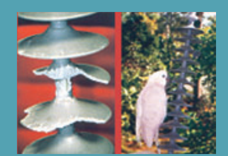
## • Termoplástico

Un plástico es un material al que se puede dar forma. Si no se aclara otra cosa, se sobreentiende que se trata de un plástico sintético, resultante de la industria

[10] Hoy se desalienta el uso del plomo, porque algunas de sus sales son tóxicas. En América y Andalucía todavía llamamos *plomeros* a quienes trabajan con instalaciones de agua, aunque usen caños de otro material.

[11] El blanco, además, es poco atractivo para los vándalos, porque el aislador queda del mismo color antes y después de que le hagan saltar el esmalte a pedradas, o con disparos.

química, y no, por ejemplo, del barro o del yeso que, también, son plásticos en el sentido primitivo del término. Un termoplástico es un plástico que se ablanda con el calor; se puede fundir, y volver a usar.



Aislador compuesto atacado por cacatúas tropicales. Sólo picotean los aisladores nuevos, quizá por el olor de la goma.

## Termorrígido

Un plástico termorrígido es el que, una vez polimerizado, ya no se ablanda con el calor, y no se puede fundir para reciclarlo. Es el caso de las resinas epóxicas.




*Traducción del chino: "¡Abastecemos el 70% del consumo!"*

## Polímeros

Un polímero es un material de moléculas muy grandes, formadas por otras menores, los monómeros. La unión de monómeros es la polimerización. Por ejemplo, el Poxipol® se vende en forma de monómero. Cuando se mezclan sus dos componentes, se polimerizan y queda un sólido. Su nombre químico es epoxi, o resina epóxica, un muy buen aislante eléctrico. Otros ejemplos de polímeros son el polietileno, el polivinilo, el poliuretano y el poliéster.

Barras de resina epoxi reforzadas con fibras de vidrio, fabricadas por Golden Phoenix.
Cuando se las cubre con fundas aletadas de goma, sirven de aisladores orgánicos de alta tensión.

## Elastómeros

Reciben ese nombre los polímeros elásticos, entre ellos las gomas de silicona, algunas de cuyas variedades se pueden preparar con la mezcla de dos componentes.

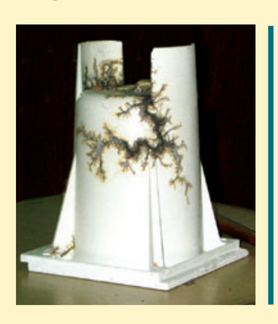
## PRFV (plástico reforzado con fibras de vidrio)

Seguramente, este material es uno de los que más han hecho avanzar todas las ramas de la industria. Se hilan en caliente fibras de vidrio de diez micrones de diámetro, más finas que una tela de araña.[12] Con millones de esos hilos en paralelo, impregnados en epoxi para mantenerlos juntos, se hacen barras, llamadas de epoxi–vidrio, muy resistentes y de muy buena aislación.

Aparte de su uso eléctrico, Los plásticos reforzados con fibras de vidrio se usan

[12] Una tela de araña de cien micrones resiste cinco gramos de peso, lo que equivale a una resistencia a la tracción de 6.500 kg por centímetro cuadrado, comparable con la del acero. La resistencia a la tracción del vidrio hilado es, aún, mayor. Pero no es que el material en sí sea muy resistente; lo que realmente resiste es su superficie, tanto más extensa cuanto más finamente hilado esté el vidrio.

para hacer chapas acanaladas translúcidas para techos, toldos rígidos, protecciones de guardabarros, piletas de natación, bandejas, sillas y agujas de tejer.



**Aislador de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio (el material es semejante al que se usa para hacer piletas de natación). Con fines experimentales se lo mojó y se le aplicó alta tensión, hasta que saltaron chispas que carbonizaron la pieza.**

## Aisladores compuestos[13]

Estos aisladores se componen de un núcleo de epoxi–vidrio envuelto en una funda de goma aletada. Cuando llueve o se humedecen, las aletas aumentan la longitud de agua para que, aun, en esas condiciones provean una buena aislación.

## Comparación de propiedades de materiales eléctricos

El mundo está cada vez más poblado y crece la demanda de energía eléctrica de cada uno de sus habitantes. En las ciudades, apenas queda sitio para el tendido eléctrico. Los aparatos de distribución en media tensión (interruptores, fusibles, transformadores) tienen que ser cada vez más pequeños, y soportar condiciones de servicio más severas que antaño. Esa presión es tan intensa que, aún los profesionales más conservadores y apegados a lo que aprendieron en las etapas tempranas de sus vidas, estudios y prácticas profesionales, terminan aceptando los nuevos materiales, a veces, a regañadientes y con añoranza de las ventajas de los antiguos. Sigue un resumen comparativo para conductores y aislantes eléctricos.

Feliz combinación de cobre y aluminio para barras de alimentación eléctrica en grandes edificios. La corriente circula, principalmente, por el cobre, y parte por el aluminio que, con su gran superficie, ayuda a la disipación del calor.

## Conductores

Para fines de transmisión de energía y para igual corriente, el aluminio es más barato[14] y liviano que el cobre; y en las aplicaciones de alta tensión los inconve-

[13] En el ambiente eléctrico, a los aisladores compuestos de núcleo y envoltura les dicen aisladores poliméricos, o aisladores orgánicos, a pesar de que los de epoxi y los de polietileno también son orgánicos, y poliméricos.

[14] El mayor costo en la producción de aluminio no es el del mineral del que se lo extrae, ni el de su transporte, sino de la energía eléctrica que se utiliza para descomponerlo. El costo del aluminio fluctúa, entonces, junto con el de la electricidad.

nientes de empalme y resistencia de contacto se pueden resolver satisfactoriamente. Es ventajoso, también, en las instalaciones de grandes edificios e industrias, donde se lo usa en forma de barras. Pero sus empalmes requieren personal idóneo de instalación y mantenimiento.

Para conductores de pequeño calibre es preferible el cobre, porque ocupa menos sitio, ahorra aislación y es fácil de unir a presión, y de soldar.

## Aislantes

Los cerámicos resisten bien la radiación solar; también, las chispas superficiales que se producen en los aisladores instalados cerca del mar, causadas por la niebla salina conductora. Están a salvo de la carbonización, porque carecen de carbono; no necesitan petróleo para su fabricación; los loros no los picotean y, en grandes cantidades, son muy baratos.



Las bujías de coche se hacen con aislantes cerámicos. La porcelana resiste bien las elevadas temperaturas del motor de explosión, y aísla los 20 kV para las chispas de encendido.

Pero, en su contra, son pesados y, como se hornean a más de mil grados, no se les puede poner piezas metálicas de fijación incorporadas, Sus bases y cabezas metálicas son muy grandes, y hay que pegárselas después con cemento. Son frágiles, y tientan a los vándalos.

En cambio, los aisladores de materiales orgánicos son livianos, admiten su fabricación en pequeñas cantidades, porque no requieren hornos grandes; resisten los golpes y disparos de armas; además los vándalos los ignoran, porque, cuando reciben un golpe, no estallan en mil pedazos como los aisladores de vidrio, ni marcan el acierto con un cambio de color.



**Epoxi hidrófoba desarrollada por Huntsman (ex Ciba–Geigy). Rechaza el agua, que no llega a conectar vivo y tierra.**

Aunque los aisladores de materiales orgánicos no son eternos como los de porcelana, soportan razonablemente bien el paso del tiempo. Hay variedades resistentes a la carbonización y, algunos, carecen, exteriormente, de carbono, porque están envueltos en goma de silicona. Como se los elabora a temperaturas no mucho mayores que 150 grados centígrados, admiten la colocación de piezas metálicas internas, electrodos, insertos y amarres.

Pero, en su contra, son combustibles; sus materias primas provienen del petróleo que empieza a escasear; no resisten altas temperaturas y el sol los desluce y los vaporiza, paulatinamente.

## • Cálculos de conveniencia

En el estudio de costos interviene, naturalmente, el precio del producto, la conductividad de un material conductor, la resistividad, si es un aislante; la densidad (de la que depende el peso de las piezas fabricadas), la duración, y el costo del mantenimiento, entre otros factores. Pero, a veces, el frío cálculo matemático no es del todo acertado, porque el mundo es más complejo que las ideas que nos hacemos de él.[15]

Hecha esa salvedad, consideremos este ejemplo simplificado:

• *¿en qué porcentaje se puede estimar la economía que brinda el uso del aluminio, con respecto al cobre, en el tendido de una línea de alta tensión?*

**Respuesta**

Sin considerar que el mayor grosor del cable facilita su enfriamiento y que, su menor peso permite ahorrar en torres y aisladores, y basados, solamente, en el propósito de hacer una línea de igual resistencia eléctrica, tenemos en cuenta que, para longitudes iguales, la relación de secciones es la inversa de la relación de conductividades.

De acuerdo con los datos de este capítulo, la sección de aluminio será igual al producto de la sección del cobre por el factor 0,58 / 0,37.

Por otra parte, la relación de densidades es de 2,7 a 8,9. El nuevo peso, en consecuencia, será igual al producto del peso de cobre por el factor (0,58 / 0.37).(2,7 / 8,9), que da 0,476. La línea de aluminio pesará menos de la mitad de lo que pesa la de cobre.

Por último, los precios de los metales están en la proporción 3 a 4, entonces, la relación de costos valdrá 0,3566. La economía es, por lo menos, del 64 por ciento.



• Arriba, transformador aislado en aceite contenido en una cuba de metal. Abajo, otro de aislación sólida de epoxi; pero su uso se limita a ambientes protegidos de la intemperie.

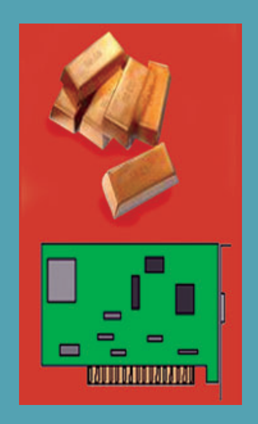


## PROPUESTAS DE ESTUDIO

**6.1.** ¿Qué se podría hacer para disminuir el vandalismo que afecta las instalaciones eléctricas aéreas, en casi todo el mundo?

**6.2.** ¿Qué valor de sección transversal, en milímetros cuadrados, debería tener un

[15] Un profesor de luminotecnia del que sólo recordamos su apellido, Yepes, nos dio el problema de calcular en cuánto tiempo se amortizaría el costo de reemplazar las antiguas lámparas incandescentes que alumbraban el Puente Avellaneda, por otras más caras de sodio, pero que dan más luz y consumen menos energía. Obedientes, hicimos el cálculo y hallamos el resultado. El docente, además funcionario municipal, nos hizo ver con amabilidad que habíamos olvidado un factor crucial: el humano. Los destrozos causados periódicamente por los fanáticos daban por tierra con nuestras ecuaciones. Siempre brindaba su experiencia profesional en las clases.



La cantidad de oro que se utiliza para mejorar los contactos eléctricos de los circuitos impresos, es baja; y su costo, moderado.

alambre de aluminio para que su resistencia eléctrica sea la misma que la de otro alambre de cobre de la misma longitud? ¿Y cuál sería su diámetro?

**6.3.** Con los datos del capítulo 4, ¿a cuántos IACS equivale la conductividad del aluminio?

**6.4.** Los contactos de las plaquetas de una computadora pueden totalizar un área de veinte centímetros cuadrados y se los recubre con dos micrones de oro. ¿Cuánto vale el oro usado en una computadora? Un micrón es la milésima parte de un milímetro; la densidad del oro es de 19,4 gramos por centímetro cúbico, y una onza Troy (31,1034768 gramos) de ese metal vale mil dólares.

**6.5.** El diámetro de los alambres de cobre, y otros, se suele dar en milímetros, y también en AWG,[16] el mismo número que se usa en joyería y *body piercing* para designar el calibre de los aretes.[17] Más grande el número, más fino el alambre. Esa norma establece 44 diámetros o calibres: 0000, 000, 00, 0, 1, 2, 3,... 38, 39 y 40. El 0000 corresponde a 0,46 pulgadas; el 39, a 0,005 pulgadas; y el resto se distribuye de modo que la relación ente dos calibres consecutivos sea la misma para todos. Con esos datos, calculen qué calibre AWG tiene un alambre de un milímetro de diámetro. Una pulgada equivale a 25,4 milímetros. *(Pueden tomarse el hermoso trabajo de deducir la fórmula, o copiarla de algún lado.)*

## Otras fuentes de estudio e información

Sugerimos buscar en Internet con las palabras cobre, aluminio, elastómeros, alta tensión, superconductividad y levitación magnética (hay vistosos vídeos, con trenes de verdad y modelos pequeños).

*http://imagenes.mailxmail.com/cursos/imagenes/7979_12_2.jpg*
- Fotografía infrarroja de una línea aérea, en la que los cables tibios se ven luminosos.

*http://www.kr2-egb.com.ar/anodizado.htm*
- Instrucciones caseras para anodizar aluminio.

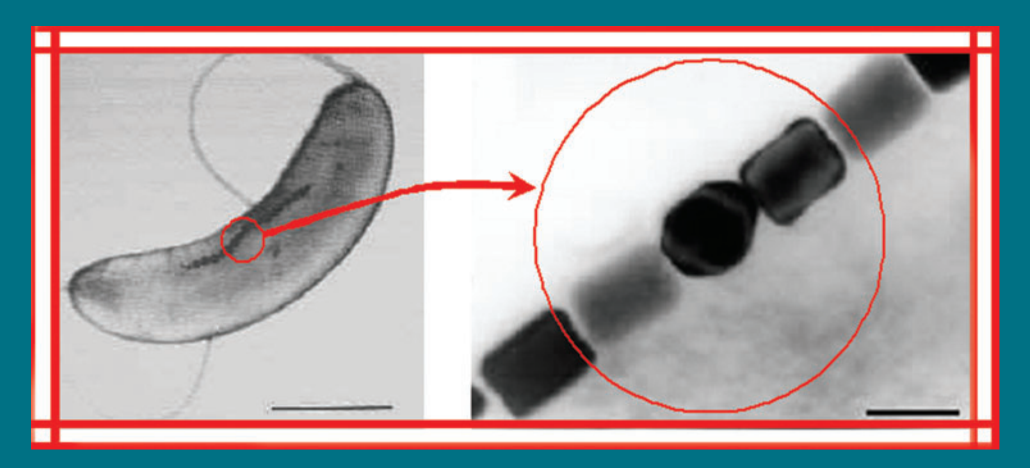



Calibre, o galga, para medir diámetros de alambres, y espesores de chapas.

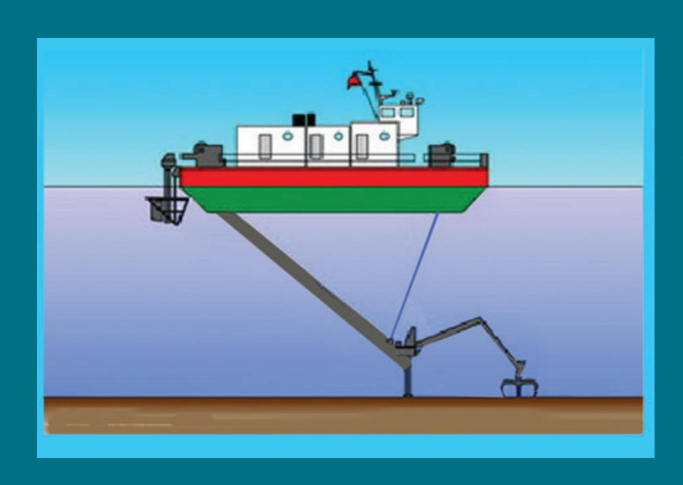
[16] *American Wire Gauge*, calibre estadounidense de alambres.

[17] La influencia de la industria británica y estadounidense se extiende a muchas unidades de medida, todavía usuales en la Argentina. Por ejemplo, compramos la madera en metros de largo, pero en pies de ancho y pulgadas de espesor; la capacidad de las heladeras se da en pies cúbicos; su potencia de enfriamiento en BTU (unidades térmicas británicas) por hora; medimos la presión de los neumáticos en PSI (libras por pulgada cuadrada); el oro se pesa en onzas Troy; y el diámetro de los tornillos y la diagonal de las pantallas se expresa en pulgadas. Es bueno usar las unidades internacionales, que coinciden con las legales argentinas; y también conviene conocer las otras unidades.

# Magnetostática

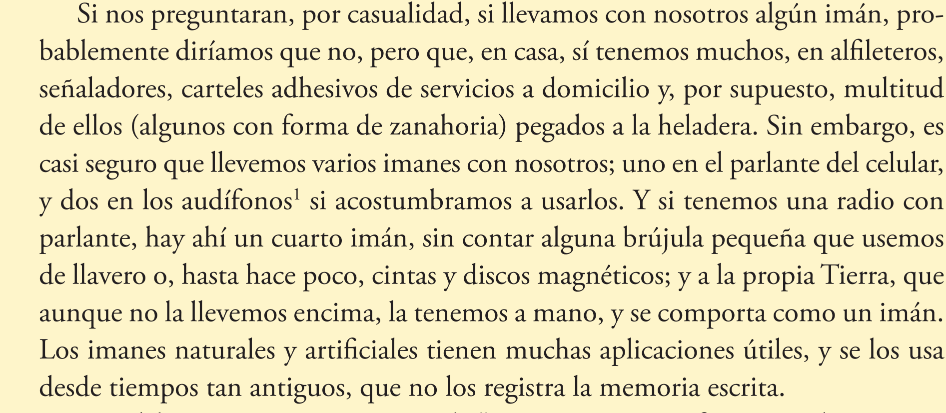


Bacterias *magnetotácticas*, que sintetizan imanes microscópicos en su interior, llamados *magnetosomas*. Son las brújulas más chicas del mundo, y las descubrió el estudiante graduado Richard P. Blakemore, cuando era investigador auxiliar en microbiología, en 1975. La componente vertical del campo magnético terrestre sirve a esos organismos para distinguir el arriba del abajo, y así sumergirse para huir del oxígeno, cuyo exceso los mata.



Se han sembrado esos microbios en lechos de ríos contaminados con cromo, cobalto y otros metales insalubres, que las bacterias ingieren y convierten en imanes. Se multiplican hasta agotar su alimento, y después se las extrae con grúas magnéticas. Con ese barro se hacen ladrillos, para que los materiales tóxicos ya no se disuelvan. El río queda más limpio.

# Magnetostática



Si nos preguntaran, por casualidad, si llevamos con nosotros algún imán, probablemente diríamos que no, pero que, en casa, sí tenemos muchos, en alfileteros, señaladores, carteles adhesivos de servicios a domicilio y, por supuesto, multitud de ellos (algunos con forma de zanahoria) pegados a la heladera. Sin embargo, es casi seguro que llevemos varios imanes con nosotros; uno en el parlante del celular, y dos en los audífonos[1] si acostumbramos a usarlos. Y si tenemos una radio con parlante, hay ahí un cuarto imán, sin contar alguna brújula pequeña que usemos de llavero o, hasta hace poco, cintas y discos magnéticos; y a la propia Tierra, que aunque no la llevemos encima, la tenemos a mano, y se comporta como un imán. Los imanes naturales y artificiales tienen muchas aplicaciones útiles, y se los usa desde tiempos tan antiguos, que no los registra la memoria escrita.



Brújula de campaña militar que usó Shih Huang Ti, el primer emperador de la China, en el siglo III aC. El brazo del muñeco apunta siempre hacia el sur.

La palabra imán proviene, quizá, de "*pierre aimant*", en francés piedra amante, porque no se separa del hierro. Los viajeros contaban que en Magnesia,[2] una región del Asia, había en el suelo un mineral negro, que después se llamó *magnetita*, cuyas partículas se adherían a los clavos de hierro de las botas. Una antigua historia china, parecida a la de Romeo y Julieta, cuenta de un joven que visitaba en bote clandestinamente a su amada, guiado en la niebla por una piedra que ella le había regalado, y que apuntaba siempre hacia la estrella de la que supuestamente había caído.

Primitivamente se usaron imanes naturales de magnetita, y después de acero. Desde mediados del siglo XX, y hasta hoy, se los hizo de cerámicas; y actualmente, hay nuevos materiales de propiedades magnéticas mucho más marcadas.




**Grabado de *Sobre los imanes*, de William Gilbert. Los herreros del siglo XVI sabían que si se golpea un trozo de hierro orientado de norte a sur, se imanta. (Septentrio y avster significan norte y sur en latín).**



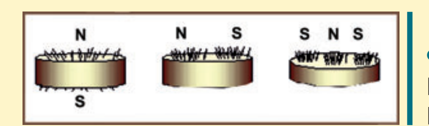
Imanes muy fuertes de neodimio, hierro y boro, desarrollados en 1983 por Metales Especiales Sumitomo, en el Japón, y por General Motors, en los Estados Unidos.

[1] Se comprueba que los auriculares tienen imanes, porque cuando acercamos uno al otro, se atraen o se rechazan, según su posición; además, colgados, sirven de *brújulas*. (La palabra brújula significa caja pequeña. En ella se guarda una aguja imantada que puede girar libremente sobre un pivote, o en un flotador.)

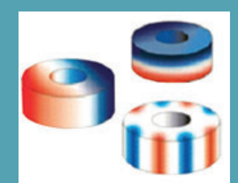
[2] Magnesia es el nombre de una antigua ciudad, fundada, según la leyenda, por el semidiós Magnes, que quizá signifique el Grande. De ahí proviene el nombre de la magnetita, o piedra imán, y de la magnesia, un óxido metálico del que se obtiene el magnesio.

## Polos

En un imán, los *polos* son las zonas donde se manifiestan las fuerzas más intensas y donde se acumulan pelusas, limaduras y objetos pequeños de hierro que hayan resultado atraídos. Si hay sólo dos, se comprueba que si el imán cuelga de un hilo, se orienta con una de esas zonas hacia el norte y la otra hacia el sur; y así se nombran sus polos. Pero después se notó que, como en la electricidad, los polos del mismo nombre se rechazan, mientras que los opuestos se atraen. Pero en vez de enmendar la costumbre de llamar polo norte al que apunta al norte, hoy se prefiere decir que en el Polo Norte de la Tierra hay un polo sur magnético, y viceversa.




**Un imán tiene al menos dos polos opuestos, pero pueden existir más polos, en cantidades pares o impares; iguales o diferentes.**



Imanes de la misma forma, pero de diferentes distribuciones y cantidades de polos.

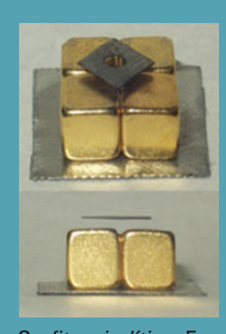
No existen los polos magnéticos únicos o aislados; en cambio, sí hay cargas eléctricas aisladas de una misma polaridad.

## Propiedades magnéticas de la materia

La explicación de las fuerzas magnéticas, entre los materiales, corresponde a la física cuántica y se relaciona con la cantidad de electrones que hay en cada capa que rodea el núcleo de un átomo, y con el movimiento de esos electrones.

Se llaman *ferromagnéticos* los materiales cuyo comportamiento es semejante al del hierro. Esos materiales se atraen[3] con los imanes, y separados de estos, mantienen algún grado de magnetismo, o sea, que se pueden convertir en imanes permanentes. Son ferromagnéticos el hierro, el cobalto, el níquel,[4] el gadolinio, el disprosio, y muchas aleaciones en las que forman parte esos metales.

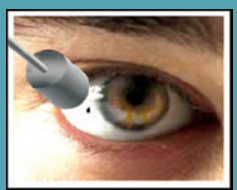
Reciben el nombre de *paramagnéticos* los materiales que se atraen con los imanes, pero no entre sí, a menos que haya un imán cercano. No retienen el magnetismo. Son paramagnéticos el aluminio, el magnesio, el titanio, el wolframio y ciertas aleaciones de hierro.



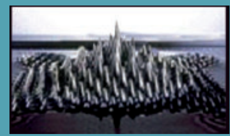
Grafito *pirolítico*. Ese material, de una variedad especialmente diamagnética, se mantiene suspendido sobre imanes fuertes. Pirolítico significa obtenido con altas temperaturas.

[3] Decimos se *atraen* con los imanes, y no que *son atraídos* por ellos, para recordar la ley de acción y reacción de Isaac Newton. Si un cuerpo atrae a otro, resulta atraído por él, y con una fuerza igualmente intensa. Los dibujos animados muestran personajes que extraen un imán del bolsillo y atraen con ellos al instante yunques y locomotoras, mientras que a los imanes no les pasa nada. Esas escenas son humorísticas, y no pretenden representar la realidad.

[4] Los nombres del níquel y el cobalto se deben a que fueron muy difíciles de separar del hierro. En alemán, *kobold* significa duende; y *níquel*, endiablado.



Un accidente que ocurre en la industria, cuando por descuido no se usan anteojos de protección, es la entrada de una partícula en el ojo. Cuando es de hierro, el oftalmólogo la puede extraer con un imán.

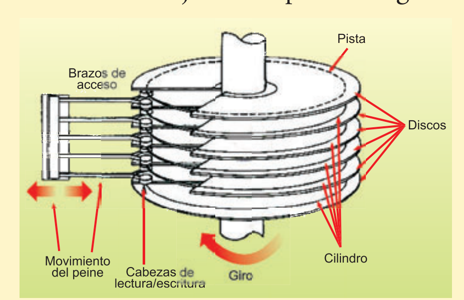


Curioso comportamiento de una suspensión de partículas de hierro, cobalto y níquel, de un tamaño de un centésimo de micrón cada una, en un medio líquido. Cuando se aproxima un imán, las partículas se magnetizan y se agrupan. Si se retira el imán, se comportan como un líquido común. El material es paramagnético, a pesar de que para esos metales la temperatura ambiente es mayor que la de Curie.

Los materiales *diamagnéticos* son los que se repelen con los imanes, por ejemplo el bismuto, el cloruro de sodio, el cobre, el oro, el silicio, el germanio, el grafito, el azufre, el hidrógeno y los gases nobles.

Los casos de diamagnetismo que hoy conocemos corresponden a fuerzas muy débiles, que sólo se observan en condiciones de laboratorio, o muy cuidadas.

Las propiedades magnéticas de los materiales se aprovechan con diversos fines. Una de las aplicaciones más difundidas es, hoy, el almacenamiento de datos en los discos rígidos[5] de las computadoras. Como están hechos con materiales ferromagnéticos, retienen el magnetismo; y con él, los datos. Aunque se lo nombra en singular, un disco rígido está compuesto por varios discos apilados, que giran en bloque a 7.200 revoluciones por minuto. Cada lado del disco se puede grabar y leer, como una antigua cinta de audio, con igual cantidad de cabezas lectoras y grabadoras compuestas por diminutos electroimanes, o sea trozos de hierro rodeados de bobinas por las que circulan pulsos de corriente. Los datos se almacenan en zonas físicas llamadas *sectores*, cada uno de los cuales pertenece a una pista *circular*. Un conjunto de pistas de igual diámetro es un *cilindro*.




Un antiguo disco flexible cuadrado de 1,44 MB (Mbyte) tiene dos lados, 80 cilindros y 18 sectores por pista, cada uno de los cuales almacena 512 byte, octetos o caracteres. Un disco rígido puede tener más de diez caras, e igual cantidad de cabezas lectoras y grabadoras; miles de pistas en cada cara; y más de cien sectores por pista, en los que almacena, en total, varios miles de millones de bits, o unidades de información, cada una de las cuales tiene un tamaño aproximado de un micrón.

## Temperatura de Curie

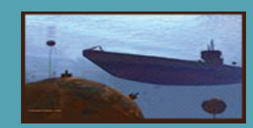
La temperatura de un cuerpo se puede relacionar con el estado de agitación de las partículas que lo constituyen. Por ejemplo, a cero grado Kelvin, o absoluto, las partículas están idealmente inmóviles; y a la temperatura ambiente, la velocidad de una molécula de nitrógeno del aire es de centenares de metros por segundo.

El magnetismo de un material resulta de la acumulación de los efectos magnéticos de todas las partículas que lo componen. Si éstas alcanzan un grado de agitación suficiente, se desordenan, y el magnetismo conjunto de sus átomos se

[5] El nombre *rígido*, que en España es *duro*, distingue ese dispositivo de almacenamiento de datos, de otros que están prácticamente en desuso: los discos flexibles, o floppies.

pierde. Esa temperatura, llamada de Curie, en honor del investigador francés Pierre Curie (1859–1906) es diferente para cada material; la del hierro es de 770 °C.

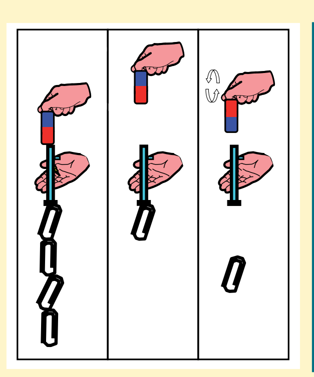
Cuando alcanzan la temperatura de Curie, los imanes permanentes pierden su ferromagnetismo, y se tornan paramagnéticos.



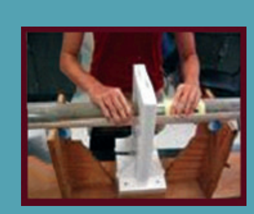
- En la Segunda Guerra Mundial se usaron minas submarinas que estallaban cuando las chocaban los barcos. Pero las minas magnéticas explotaban sin contacto. El campo terrestre induce magnetismo en los barcos, y éstos movían una brújula dentro de la mina, que conectaba el detonador. (Hay medios de neutralizar ese efecto.)

## Inducción magnética

En el lenguaje llano *inducir* es persuadir, ocasionar, conseguir que alguien haga algo. En electricidad y magnetismo ese término tiene casi el mismo significado. Tal como existe una inducción electrostática (detallada en el capítulo 1), por la cual se puede cargar un cuerpo, inicialmente neutro, al acercarle otro cargado, es posible magnetizar un cuerpo al aproximarle un imán, aunque ese objeto pueda perder su magnetización casi por completo cuando el imán se aleja.



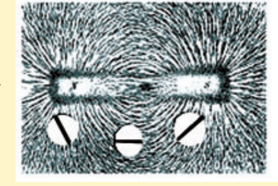
**El clavo, normalmente, no atrae los clips, pero sí lo hace cuando se le acerca una barra imantada. Cuando se aleja ese imán, el clavo deja de atraer los objetos, aunque no pierde del todo su magnetización. Para que la pierda, es necesario invertir el imán y acercarlo un poco.**



- El *paleomagnetismo* estudia las variaciones del campo magnético terrestre en la historia geológica. Para ello se toman muestras de minerales de épocas conocidas, y se determina en qué orientación fueron inducidas. Se sabe así que los polos magnéticos de la Tierra intercambiaron sus polaridades muchas veces; la última hace medio millón de años.

## Representación del campo magnético

Primitivamente, se llamaba *campo magnético* cualquier región del espacio en la que se manifestarán fuerzas magnéticas. Pero desde 1905, cuando Albert Einstein publicó su trabajo *Sobre la electrodinámica de los cuerpos móviles*, esa idea se modificó.[6]






El campo hoy no se considera, simplemente, un lugar del espacio, sino un objeto tan real como cualquiera, en el sentido de que tiene masa, y puede

[6] *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik, 17, 891-921 (1905) (*Sobre la electrodinámica de los cuerpos móviles*, A. Einstein, Anales de Física 1905).

existir, independiente de que hayan o no cuerpos que se atraigan o se repelan.[7]

Cuando se coloca una brújula en las proximidades de un imán, se orienta de acuerdo con la intensidad relativa de la atracción entre el polo norte del imán y del polo sur de la brújula, y las demás combinaciones de atracción y rechazo. La orientación de la brújula, en cada punto, define la dirección de la *línea de campo* local. Lo mismo se consigue si se espolvorean las proximidades del imán con limaduras de hierro, o con pelusa de lana de acero.

Esa útil representación ideada por Michael Faraday[8] sirve para apreciar la intensidad del campo magnético, por medio de la cantidad de líneas que atraviesan una dada superficie. En la figura anterior se ve que las líneas son más densas en las proximidades de los polos, precisamente, donde las fuerzas son mayores.

Las líneas de campo no existen realmente donde se las dibuja; son sólo una representación; hay también campo magnético entre dos líneas consecutivas. No importa con cuántas líneas se represente un campo, siempre se pueden imaginar líneas intermedias, indefinidamente. Comprobamos eso si esparcimos polvo de hierro, o fragmentos de lana de acero, sobre un papel colocado encima de un imán: difícilmente hallemos una línea entera de partículas encadenadas que una ambos polos; se forman cadenas orientadas en cualquier punto.

## Materiales magnéticos industriales

En el ambiente eléctrico se suelen emplear las palabras *blandos* y *duros* para clasificar algunos materiales magnéticos; pero esas palabras no se refieren a la dureza mecánica. Un material duro es el que conserva el magnetismo y, por eso, es apropiado para fabricar imanes permanentes, por ejemplo para altoparlantes, motores, discos rígidos y otras aplicaciones. Uno blando es el que no retiene el magnetismo, propiedad útil para hacer transformadores, cabezas grabadoras y reproductoras, porteros eléctricos y grúas magnéticas.



Transformador de 220 a 110 V de núcleo de hierro–silicio de grano orientado. Si fuera de hierro común, sería más grande y pesaría más del doble.

Los nombres “blando y duro” se justifican en que los primeros materiales magnéticos de importancia industrial fueron los aceros, y se da la coincidencia de que los más duros y templados son los que más sirven para hacer imanes permanentes.

Los metales pueden tener una estructura cristalina, en la que los átomos están, regularmente, orientados como las naranjas en una frutería. Pero ese orden no abarca más que regiones pequeñas, llamadas *granos*, visibles sólo al microscopio. Los diferentes granos tienen cada uno su propia orientación, y las del conjunto de granos están dispuestos al azar.

[7] Por ejemplo, cuando una estación de radio deja de transmitir, sus ondas siguen existiendo durante algunas fracciones de segundo en la Tierra, y quizá durante muchos años en el espacio.
[8] En el capítulo 1 se encuentra información sobre este investigador.

- El ***hierro–silicio de grano orientado*** es el material magnético que más se emplea hoy en la industria. Se lo usa en el armado de generadores, transformadores y motores eléctricos. Se lo hace con una aleación en la que intervienen, principalmente, el hierro y el silicio, pero cuando se lo estira en láminas, en caliente, sus granos se orientan en la dirección de la laminación, y eso refuerza sus propiedades magnéticas.
- La ***ferrita***, conocida también por su nombre en inglés, *ferrite*, es un material cerámico compuesto por hierro y sus óxidos, bario, estroncio, molibdeno, y otros elementos no metálicos, como el boro. Se la prepara en forma de polvo fino compactado a presión y después horneado como una porcelana. Hay ferritas de varios tipos, tanto para hacer imanes permanentes como para fabricar objetos que se deban desmagnetizar. Después del hierro–silicio, las ferritas son hoy los materiales magnéticos más usados. Las podemos ver en audífonos, altoparlantes, imanes domésticos, en los transformadores de artefactos fluorescentes alimentados con baterías, en adaptadores de antena de TV, y en el abultamiento que tienen algunos cables de impresoras y computadoras, donde se coloca un anillo de este material para interceptar las interferencias.
- Una variante de las ferritas son los ***imanes de goma***, que se fabrican con la incorporación de los mismos polvos a un elastómero. Este material se usa para hacer burletes flexibles para las puertas de las heladeras, y anuncios para adherir a muebles de hierro. Se los fabrica de modo que los polos norte y sur quedan del mismo lado, en forma de surcos alternados paralelos.

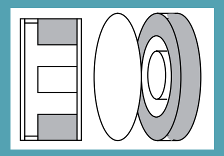



**• Anuncios para adherir a muebles de hierro, con muchos polos sur y norte alternados. A la izquierda, polos revelados con polvo de hierro. A la derecha, dos anuncios que se atraen y se rechazan, alternadamente, cuando se los desliza enfrentados.**

Eso se comprueba si se exploran esos imanes con una aguja de coser colgada de un hilo, o bien con una brújula; o más fácilmente, si se desliza uno de esos anuncios sobre otro igual. Si enfrentamos los reversos de dos de esas tarjetas y las deslizamos entre sí en la dirección correcta, se separan y se juntan rítmicamente a la vez que se oye el ruido de los choques: tap-tap-tap... (o trrr... si el movimiento es más veloz), cada vez que sus bandas de polaridad alternada se enfrentan con polos iguales u opuestos.

Estos materiales son una variante de las cintas magnéticas de audio y de vídeo, que aún se usan, especialmente, para el resguardo de rutina de datos informáticos.

- El ***metal mu***, más conocido como mu metal, como se le dice en inglés, es una ale-

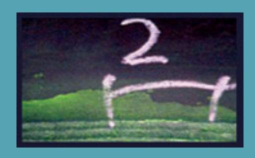


• Vista en corte de un audífono. Tiene una bobina arrollada alrededor de un núcleo de hierro, una espalda del mismo material, un anillo de imán permanente, y una lámina delgada de hierro que vibra cuando la corriente que pasa por la bobina altera la magnetización. El imán permanente es de ferrita.

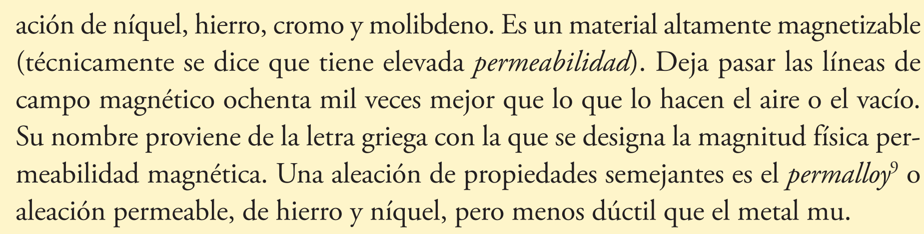


• Relevador de lengüeta, más conocido como *reed relay*. Cuando se le acerca un imán, se tocan dos láminas, una de ellas flexible, de material paramagnético. Se los usa en puertas de hornos de microondas, y en alarmas contra intrusos. También actúa cuando se hace pasar corriente por una bobina arrollada sobre él.

ADVERTENCIA: *ES PELIGROSO ANULAR, CON UN IMÁN EXTERIOR, ESTA PROTECCIÓN DE LOS HORNOS DE MICROONDAS.*



- En la parte inferior de la figura se aprecia una fisura de menos de un micrón de ancho, detectada en una pieza de acero por medio de una suspensión líquida de polvo magnético.



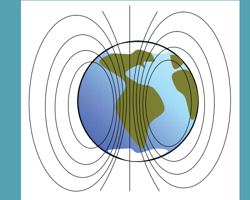
ación de níquel, hierro, cromo y molibdeno. Es un material altamente magnetizable (técnicamente se dice que tiene elevada *permeabilidad*). Deja pasar las líneas de campo magnético ochenta mil veces mejor que lo que lo hacen el aire o el vacío. Su nombre proviene de la letra griega con la que se designa la magnitud física permeabilidad magnética. Una aleación de propiedades semejantes es el *permalloy*[9] o aleación permeable, de hierro y níquel, pero menos dúctil que el metal mu.

- Hay ***líquidos magnéticos***, en realidad suspensiones de polvo magnético en líquidos, que se emplean para detectar fisuras invisibles en piezas de acero. Se pintan las piezas con ese líquido, se las somete a un campo magnético; y donde hay una fisura, el campo se dispersa, atrae las partículas de la suspensión, y con eso se revela el defecto. (Esa inspección es un *END*, o ensayo no destructivo).
- En algunos centros de investigación se desarrollan materiales magnéticos para emplearlos en refrigeración, en reemplazo de los sistemas convencionales de compresión de gases.[10] Se magnetiza el material con un imán o un electroimán, El material, con eso, eleva su temperatura. Se espera a que se enfríe. Se lo pone en otro sitio, se le quita el magnetismo, y el material se enfría. Quizás algunas heladeras del futuro enfríen con una cinta de goma magnética sinfín, que pase frente a un imán, y después por el gabinete del refrigerador. El fenómeno se conoce como ***demagnetización adiabática***.

## Magnetismo en biología

Tal como había ocurrido antes con la electricidad animal, las hipótesis de existencia de órganos magnéticos en los animales tropezaron con cierta resistencia en los medios científicos, en los que no caen bien las ideas emparentadas con supersticiones o creencias infundadas, aunque sean, ocasionalmente, verdaderas. Por eso, el descubrimiento que afirma que hay bacterias que sintetizan magnetita, realizado en 1975 por Richard P. Blakemore en la universidad de Massachusetts, tuvo una gran importancia, porque reabrió vías de investigación casi abandonadas. En los diez años que siguieron se descubrió la misma sustancia en moluscos, aves y hasta en mamíferos como los delfines y se comenzó a pensar con seriedad científica que pueden haber varias especies capaces de orientarse en el campo magnético terrestre.

La observación inicial, al microscopio, fue que las bacterias se amontonaban



- El campo magnético terrestre es vertical en los polos, horizontal en el ecuador, e inclinado en las demás localidades.

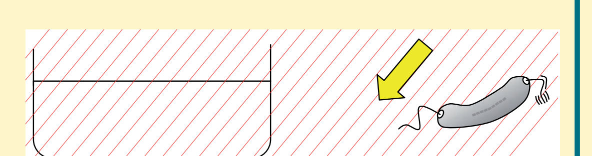
---

[9] Quizá la proliferación de palabras inglesas en la industria se deba ver no tanto como la invasión de un idioma extranjero, sino como la aparición de una nueva lengua internacional, en el ámbito de la tecnología y de la ciencia, como lo fueron el griego y el latín en todo el mundo hace pocos siglos, para el mismo fin de comunicación universal.

[10] Algunos gases de refrigeración pueden contribuir a la destrucción de la capa de ozono de la alta atmósfera, que nos protege de la radiación ultravioleta.

en un borde de una gota de agua, y las primeras explicaciones de ese efecto fueron que los microbios respondían a la luz, a contaminantes químicos o a diferencias de espesor de agua entre los vidrios del portaobjeto. La aproximación de un imán disipó toda duda y motivó el examen de las bacterias con un microscopio electrónico. El estudio de las partículas de magnetita que sintetizan mostró que su tamaño, de apenas mil átomos de diámetro, es el de mayor eficiencia magnética.

¿Para qué le sirve a un microorganismo orientarse en el campo terrestre, si tiene una vida tan breve, y un desplazamiento tan lento, que no podría aprovechar esa orientación para migrar? Eso es difícil de entender para nosotros, que navegamos horizontalmente y olvidamos, habitualmente, la componente vertical[11] del campo magnético terrestre.



**● Las bacterias anaeróbicas nadan en cualquier dirección, y les conviene hacerlo hacia abajo, donde el ambiente acuático es pobre en oxígeno. Su tamaño es tan pequeño, que no les servirían órganos como los humanos, basados en la gravedad, para la orientación espacial.**

Cada vez que se invierte el campo terrestre, lo que ocurre de manera errática en decenas de miles de años, y hasta en centenares de millones, se produce una gran mortandad de esta clase de bacterias, porque nadan al revés de como les conviene. Las escasas sobrevivientes que por alguna razón tengan su polaridad invertida (y que por eso sean escasas), después proliferan en esas nuevas condiciones más favorables para ellas, hasta llegar a ser la gran mayoría.

El caso de las palomas es algo diferente y más complejo porque, al parecer, aprenden durante su vida a ajustar sus costumbres al campo magnético actual.[12]



**● La orientación geográfica de las aves es hoy motivo de estudio, y parece depender de factores múltiples, entre ellos el visual y el magnético.**

En las palomas se halló magnetita en la parte superior del pico. Sin embargo, en experimentos en los que les ataron fuertes imanes, cuya inducción local era mucho mayor que la del campo terrestre, parecieron seguir igualmente bien orien-

[11] Las agujas de brújulas que se pueden mover en cualquier dirección, se inclinan; y en los polos, se paran de punta.

[12] Quizá los repetidos vuelos en círculos que hacen las palomas los días soleados, a la mañana temprano y al caer la tarde, les sirvan para ajustar las sensaciones magnéticas que pudieran tener, con la percepción visual del Sol cerca del horizonte, una indiscutible referencia para la orientación geográfica.

N S
N S
N S
N N

● Si se corta un imán a lo largo, las partes que resultan se rechazan, por tener los nuevos polos del mismo lado. Si se lo corta transversalmente, las partes se atraen, porque resultan polos enfrentados de polaridades opuestas. Así, a lo ancho, se dividen las bacterias cuando se reproducen, por lo que sus polaridades magnéticas resultan hereditarias.

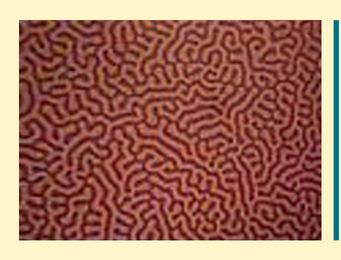


● Franz Mesmer (1733–1815) popularizó el término magnetismo animal, hoy llamado *mesmerismo* para distinguirlo de lo realmente magnético. En medios científicos se lo consideró curandería.

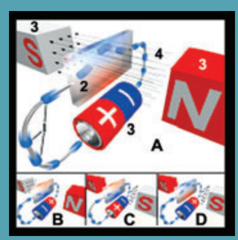
tadas en sus vuelos. Por eso se especula que esos animales no se guían solamente como brújulas sino que, además, sentirían las tensiones eléctricas que generan al desplazarse en el campo magnético terrestre cuando vuelan a gran velocidad. Los imanes que llevan no influirían en ese efecto, porque se desplazan junto con las aves; entonces, no inducen electricidad, como sí lo hace un generador cuyos conductores se mueven con respecto a los imanes. Las investigaciones no son aún concluyentes y parecen mostrar que la orientación de las aves no recurre a un único órgano.

## Teoría magnetostática y la de la inducción

Se llama *espín* (del inglés *spin*, giro) a una propiedad de cada partícula atómica que, por sus efectos, se puede interpretar como si estuviera girando, y que en las partículas cargadas se asocia además a un efecto magnético individual, llamado *dipolo*, porque nunca hay un polo magnético aislado. Cuando en una región predominan los dipolos orientados en la misma dirección y en el mismo sentido, el material presenta propiedades ferromagnéticas. Y si los dipolos elementales no están orientados, pero se orientan en presencia de un campo magnético exterior, se trata de un material paramagnético.



**Dominios magnéticos en un cristal de hierro, revelados con una suspensión líquida de finas partículas magnéticas (el líquido oscuro). Cuando no se aplica un campo magnético, la suspensión permanece cubierta por otro líquido que no es magnético (el claro). A los pocos segundos de aplicar el campo, se produce ese complejo diseño. Cada surco mide, aproximadamente, un micrón.**




Esquema del efecto Hall, tomado de Wikipedia. Los electrones que se mueven en el conductor, impulsados por la energía de la pila, reciben fuerzas del campo magnético, y se desvían a un lado. Por tanto, como ahí hay más electrones que enfrente, aparece un campo eléctrico que se puede medir, y por medio de él evaluar la intensidad del campo magnético.

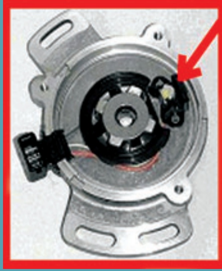
El investigador francés Pierre Weiss (1865–1940) notó que los materiales ferromagnéticos están organizados en *dominios*. Un dominio es una región en las que los dipolos elementales, o átomos, están orientados en la misma dirección y sentido. Si los dominios, a su vez, están orientados al azar, el cuerpo en su conjunto no exhibe magnetismo neto.

La teoría de dipolos y dominios es la que se acepta, actualmente, para explicar muchos fenómenos magnéticos, y para el desarrollo de proyectos industriales.

## Efecto Hall

Ese fenómeno, llamado así en honor de su descubridor en 1879, Edwin Duntey Hall, consiste en la aparición de una tensión eléctrica entre los bordes de un

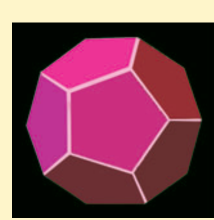
conductor por el que circula corriente, cuando se lo somete a un campo magnético perpendicular. En 1985 se desarrollaron materiales en los que se observa el llamado efecto Hall *cuántico*, mucho más intenso que el descubierto inicialmente. Ese principio se aplica a los sistemas de encendido de chispa de los coches, en los que un sensor Hall detecta el paso de un imán fijo al eje del motor. Ese método es más confiable que el de los antiguos platinos. Carece de elementos que se desgasten, o que dejen de funcionar cuando se mojan.



Sensor de efecto Hall, que detecta el paso de cuatro imanes sujetos a un eje giratorio. En esos instantes precisos, el dispositivo envía pulsos de control a un circuito que genera chispas para las bujías de un coche.

## Propuestas de estudio

**7.1.** ¿Hay alguna relación entre la palabra imán, y los religiosos musulmanes que dirigen los rezos en las mezquitas?
**7.2.** ¿Tiene fundamento científico el uso de imanes que venden para colocar en los caños de agua y en los de nafta en los coches, para evitar las incrustaciones y mejorar el rendimiento del combustible?
**7.3.** ¿Por qué los imanes que se suelen poner en las puertas de las heladeras para sostener recordatorios, o de adorno, tienen los polos del mismo lado?



**7.4.** Si armáramos un dodecaedro con doce pirámides de base pentagonal, cada una de las cuales es un imán con el polo sur en el vértice y el norte en la base, ¿obtendríamos un imán con un solo polo norte hacia afuera, y sin ningún polo sur? ¿Obtendríamos así el tan buscado –y jamás hallado– monopolo magnético?
**7.5.** ¿Por qué un audífono colgado de su propio cable, no sirve de brújula?
**7.6.** Para magnetizar un trozo de hierro, ¿hay que frotarlo con un imán?



Efecto de los imanes en la pantalla de un televisor.

*ADVERTENCIA. SI LA PANTALLA QUEDARE CON COLORES DEFINITIVOS, APARENTEMENTE ARRUINADA, SE LA PUEDE DESMAGNETIZAR CON UN ELECTROIMÁN ALIMENTADO CON CORRIENTE ALTERNA (MÁS LABORIOSO ES GIRAR UN IMÁN MIENTRAS SE LO ALEJA DE LA PANTALLA.)*

## Otras fuentes de estudio e información

Sugerimos buscar en Internet con las palabras Blakemore, bacteria, ferromagnetismo, paramagnetismo, diamagnetismo, Taringa: imanes fuertes. Abundan los vídeos con demostraciones vistosas.

En *http://www.scribd.com/doc/7100742/010-Materiales-Magneticos* hay un buen artículo sobre materiales magnéticos de Juan C. Fernández, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

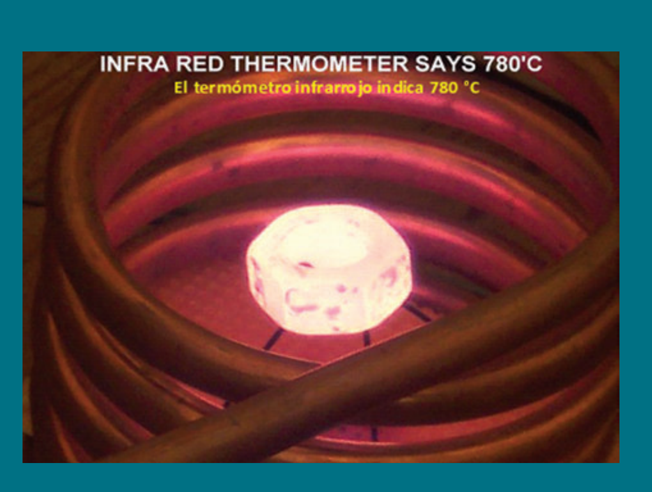
# Inducción electromagnética




● Horno experimental de inducción. Por el caño de cobre circula una corriente alterna de 100 ampere, y de más de 200 kilociclos por segundo.
El tornillo y la tuerca de hierro se magnetizan repetidamente hacia un lado y el opuesto, a la misma frecuencia, proceso en el que el hierro se calienta.
Se alcanzan 770 grados centígrados; la temperatura de Curie de ese metal, y a la que pierde sus propiedades ferromagnéticas.

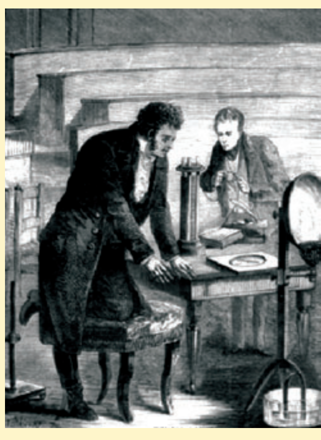


● A todo eso, el caño de cobre permanece apenas tibio.
Con la misma técnica se hacen hornallas de inducción para cocinas. Son frías al tacto, pero generan calor en las ollas y sartenes de hierro. El aceite que cae sobre la hornalla, no se enciende.



# Inducción electromagnética

Hemos visto que la proximidad de un imán magnetiza otros cuerpos; a ese efecto se lo llama *inducción magnética*. En la *inducción electromagnética*, en cambio, son las corrientes eléctricas las que generan campos, e inducen magnetismo.[1]



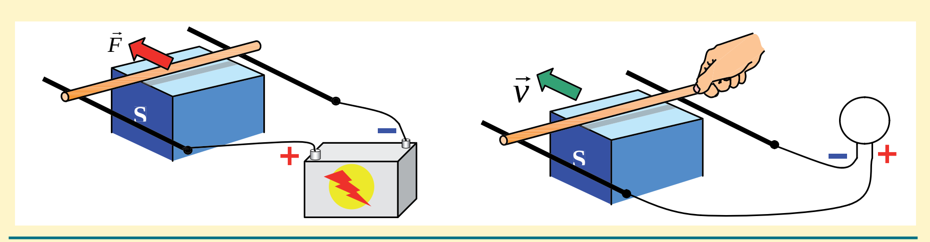
La electricidad y el magnetismo se creían independientes y el científico danés Hans Christian Oersted (1777–1851) hacía en sus clases experimentos para demostrarlo. Cruzaba sobre una brújula un alambre, al que le hacía circular corriente, y la aguja permanecía inmóvil. Pero un día un alumno repitió la prueba con la aguja de la brújula ya previamente alineada con el alambre. ¡Y la aguja se puso perpendicular! La sorpresa de Oersted, cuando vio que las corrientes eléctricas generan magnetismo, quedó registrada en la historia.[2]

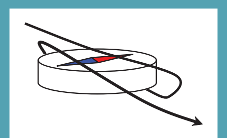
Y el magnetismo ¿genera electricidad? La respuesta es afirmativa; pero no por la presencia de un campo magnético, sino por la *variación* de ese campo. Si ponemos un imán junto a un conductor, no aparece tensión eléctrica entre sus extremos, pero sí lo hace si movemos el imán, o el conductor; uno cualquiera de ellos con respecto al otro.

Los dos efectos recíprocos mencionados se resumen en dos leyes que vinculan la electricidad con el magnetismo; son el principio generador, y el principio motor.



La aguja de la brújula, perpendicular al alambre, permanece inmóvil cuando se hace circular corriente. Pero si se alinean previamente, cuando circula corriente por el alambre, la aguja se cruza.



Si el mismo alambre por el que circula corriente, se hace pasar dos o más veces junto a la brújula, la intensidad del efecto de orientación se multiplica. Así se inventó la bobina.

[1] El descubrimiento de que las corrientes tienen efectos magnéticos, sugirió que las propiedades magnéticas de la materia se relacionan con el movimiento de cargas eléctricas en el material; hoy sabemos que son los electrones.

[2] El método científico, lejos de ser una herramienta segura y objetiva en la obtención de conocimientos, está sujeto (como muchas otras actividades sociales) a circunstancias, recursos e intereses; y, en este caso, también al azar y al prejuicio. El investigador creía, erradamente, que el supuesto efecto de la corriente sería *alinear* la brújula con el conductor, en vez de atravesarla, como ocurre realmente. La ignorancia metodológica de los estudiantes de su clase, facilitaron quizás aquel descubrimiento fortuito (esa clase de azar afortunado es más frecuente entre quienes más trabajan, estudian y piensan).

**En la página anterior, a la izquierda se ilustra el principio motor. Si se hace circular corriente por un alambre sometido a un campo magnético, aparece una fuerza sobre el conductor. A la derecha, el principio generador. Si se mueve un alambre en un campo magnético, de modo que corte líneas de campo, se genera electricidad en el conductor. En ese caso, se dice que se induce una fuerza electromotriz. El sentido de la fuerza dinámica, y la polaridad de la fuerza electromotriz, son los indicados en las figuras.**



El descubrimiento de que las corrientes eléctricas magnetizan, fue el inicio del telégrafo, y con él, el de la revolución de las comunicaciones.

## Inducción, flujo, fuerza electromotriz; ley de Faraday

La magnitud de los efectos magnéticos asociados a imanes y corrientes se caracterizan, en un punto del espacio, con la magnitud física ***inducción***, o ***densidad de flujo***, designada con la letra $B$ y expresada en unidades tesla. Por ejemplo, la inducción del campo magnético terrestre en Buenos Aires es de unos 30 microtesla. El producto de la inducción $B$, en tesla (T), por el área transversal, en metros cuadrados, es el *flujo magnético*, cuya unidad es el weber (Wb). Un tesla equivale a un weber por metro cuadrado; $1\ \mathrm{T} = 1\ \mathrm{Wb/m^2}$.

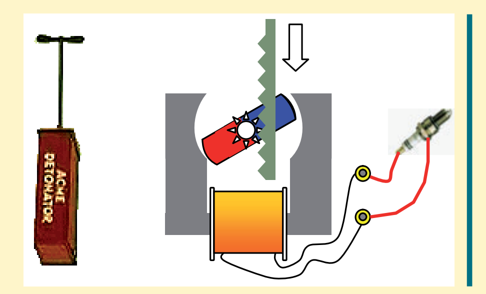
El corte de líneas de campo magnético por un conductor induce en éste una fuerza electromotriz, que se expresa en volt, y se corresponde con la tensión que aparece en los extremos del conductor, si es que forman un circuito abierto y no tienen nada conectado; también si sólo se conecta un voltímetro de muy elevada resistencia. El nombre de esa magnitud es poco afortunado, porque no se trata de una fuerza, en newton, ni en kilogramos; además las fuerzas no *producen* movimientos, sino que cambian la velocidad. Aceptada esa costumbre, el valor de la fuerza electromotriz inducida está dado por la *Ley de Faraday*:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad\qquad E = vBL$$

$E$ es la fuerza electromotriz, en volt; $\Delta\Phi$ (delta fi) es el flujo magnético, en weber, segado por el conductor que se desplaza en el tiempo $\Delta t$ (delta te). La letra griega delta mayúscula significa, como siempre, una diferencia o variación. A la derecha, una fórmula equivalente, en la que $v$ es la velocidad, en m/s, del conductor que se desplaza, $L$ su longitud en metros, y $B$, la inducción del campo magnético, en tesla.

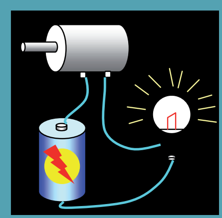


Para indicar una llamada telefónica, hoy usamos el gesto de la foto. Pero la gente de edad a veces hace un movimiento de manija, con el que los antiguos aparatos generaban, por inducción, electricidad para la campanilla remota.




**Detonador de inducción, muy seguro, usado en minería. Al bajar la cremallera, el piñón hace girar un imán cerca de una bobina arrollada alrededor de un núcleo de hierro. Se generan miles de volt, que encienden la chispa necesaria para que estalle el explosivo.**





- La fuerza contraelectromotriz se puede experimentar con los elementos de la figura: una pila, un foquito de linterna y un motor eléctrico de juguete, de los conocidos como *Scalextric*. Cuando frenamos el eje del motor con los dedos, le impedimos alcanzar mayor velocidad, para generar más fuerza contraelectromotriz, y la lámpara enciende más intensamente, porque circula más corriente.



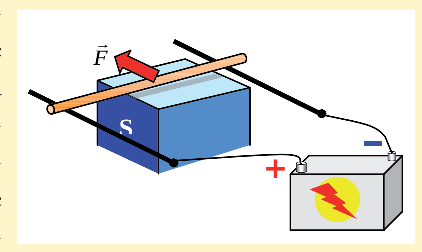
- La mente humana se predispone al razonamiento analógico e inductivo. Parece natural que cuando circule una corriente por un alambre, lo haga, también, por otro, al lado. Pero si la intensidad es constante, no ocurre tal cosa; tiene que variar. En el grabado, el filósofo inductivista Francis Bacon (1561–1626).

En el efecto motor, la magnitud de la fuerza que actúa sobre un conductor de longitud L, en metros, por el que circula una corriente de intensidad *I*, en ampere, y sometido a un campo perpendicular de inducción *B*, en tesla, está dada por la ley de Lorentz:

$$F = BLI$$

*B* es la inducción, en tesla; *I* es la corriente, en ampere; *L* es la longitud del conductor, en metros, y *F* la fuerza, en newton. (9,8 N = 1 kgf).

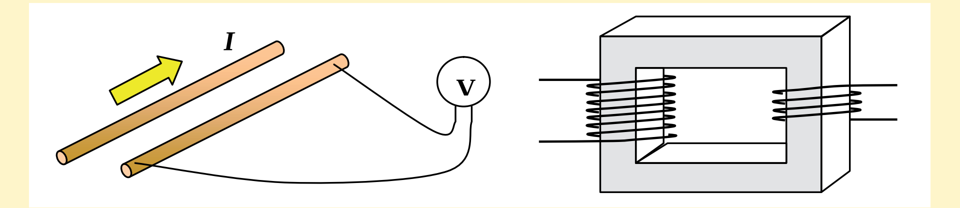
## Fuerza contraelectromotriz




Si dejamos que la barra de la figura se deslice, libremente, impulsada por la fuerza que resulta del efecto motor, a medida que vaya cobrando velocidad y, por el principio generador, se inducirá en ella una fuerza electromotriz, que será de polaridad opuesta a la de la batería. Cuando las dos tensiones se igualen, la corriente cesará, y la barra correrá, idealmente, a velocidad constante. Esa tensión inducida, por ser de polaridad opuesta a la de la alimentación, se llama *fuerza contraelectromotriz*, y aparece en todos los motores cuando ya adquirieron velocidad. En cambio, es nula en el arranque; por eso los motores hacen circular por la red una corriente elevada cuando arrancan, como lo notamos en el descenso de la tensión en una casa, cada vez que se pone en marcha una heladera, o el ascensor del edificio.

## Inducción estática

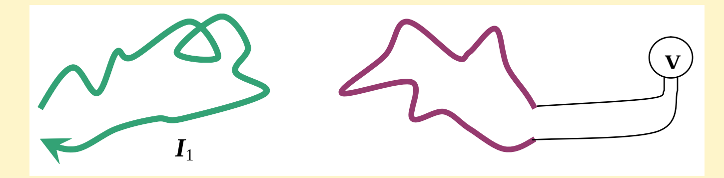
El movimiento relativo de imanes y conductores, induce en éstos fuerzas electromotrices. Si están quietos no hay inducción eléctrica, porque para ello hace falta que el campo magnético varíe, o que el conductor corte líneas de campo. Pero, esa necesaria variación del campo magnético se puede conseguir por medios *estáticos*, sin movimiento alguno. Alcanza con que la corriente de un conductor varíe en el tiempo, para que el campo magnético que genera sea también variable y, entonces, pueda inducir una fuerza electromotriz en otro conductor vecino.




● **Inducción estática. Si la corriente *I* varía en el primero de los conductores, su inducción magnética es también variable, e induce una fuerza electromotriz en el segundo conductor. A la derecha, un transformador. Si se conecta uno de sus bobinados a una fuente de tensión alterna, en el otro aparece también tensión. En cambio, si se alimenta un transformador con una tensión continua, nada aparece del otro lado, y además el *trafo*[3] se quema.**

## ● Inducción mutua

La corriente variable que circula por un conductor induce una fuerza electromotriz en los conductores vecinos. La magnitud de ese efecto depende de cuánto varíe esa corriente, y con qué velocidad lo haga; pero también depende de la forma, el tamaño y la posición de los conductores. Si son cortos y están alejados, la fuerza electromotriz inducida es menor que cuando los conductores son grandes y están cercanos uno del otro.




Ese hecho se expresa así matemáticamente:

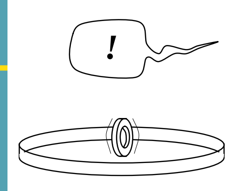
$$E_2 = \mathrm{M}\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

$\Delta I_1$ es la variación de la corriente en el primer conductor, en ampere; $\Delta t$ es el tiempo en el que ocurre esa variación, en segundos; $E_2$ es la fuerza electromotriz, en volt, que induce el primer conductor en el segundo; y $M$ se llama el *coeficiente de inductancia mutua*. Sus unidades son volt segundo sobre ampere, combinación llamada *henry*, y que se simboliza H.



● La inductancia mutua de los conductores largos y próximos puede causar interferencias, especialmente, en los de comunicaciones, que emplean altas frecuencias y, por eso, sus corrientes varían muy rápidamente.

[3] Tanto en la Argentina, como en los Estados Unidos y Alemania, se entiende que *trafo* es una abreviatura informal para *transformador*, aunque se la excluya de los documentos legales, comerciales, o muy serios.




Una formulación más general de la ley de Lenz es ésta: *La fuerza electromotriz inducida se opone a su causa*. Si hacemos bailar un imán sobre una superficie aislante, tarda más en detenerse, que si lo impulsamos sobre una bandeja de aluminio. El imán induce corrientes en el metal; y la inducción magnética de esas corrientes hace fuerzas que se oponen al giro del imán que es, en este caso, la causa de la inducción.

## Autoinducción

Un conductor no sólo induce fuerzas electromotrices en conductores vecinos; también lo hace sobre sí mismo; y resulta así, a la vez, inductor e inducido. Matemáticamente, eso se expresa de modo similar al anterior, pero ahora el factor se llama *coeficiente de autoinducción*, *autoinductancia*, o *inductancia* a secas. Se designa con la letra $L$, y se expresa en henry.

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

E es la fuerza electromotriz, en volt, que induce el conductor sobre sí mismo; $\Delta I$ es la variación de la corriente en el conductor, en ampere; $\Delta t$ es el tiempo en el que ocurre esa variación, en segundos, y $L$ es el coeficiente de autoinducción, en henry.[4] El signo negativo indica que se trata de una fuerza *contraelectromotriz*.

## Ley de Lenz

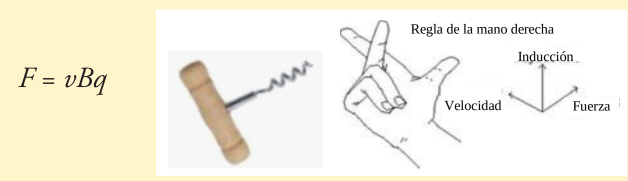
Recibe ese nombre, en homenaje a H. F. E. Lenz (1804–1865), el hecho de que la polaridad de la fuerza electromotriz inducida es siempre opuesta a la variación de la corriente que la induce. Por ejemplo, si por un conductor circula una corriente constante e intentamos interrumpirla, bruscamente, la súbita disminución de la corriente genera una fuerza electromotriz autoinducida que hace que la corriente no pueda disminuir de golpe. Es como si la corriente tuviera inercia. Aparece, entre los cables que se desconectan, una chispa larga, de una tensión mucho mayor que aquélla con la que se alimenta el circuito, y que hace que la corriente siga circulando un tiempo más, tarde en extinguirse, y gaste los contactos.

## Fuerza magnética sobre cargas en movimiento

Una forma alternativa de expresar la relación que existe entre la fuerza magnética y la corriente, más parecida a la que propuso el sabio austríaco Konrad Lorentz (1903–1989) es considerar las cargas individuales que componen una corriente eléctrica:

[4] Por ejemplo, si una bobina tiene una inductancia de un microhenry y medio; eso significa, de acuerdo con la última fórmula, que si se produce una variación de corriente de 200 A en un tiempo de 2,5 millonésimas de segundo, esa bobina se induce a sí misma una fuerza electromotriz de 60 V.

$$F = vBq$$




La letra $q$ indica el valor de la carga de una partícula, en coulomb; $v$ es su velocidad, en metros por segundo. $B$, en tesla, es la inducción magnética del campo en el que se encuentra la partícula; y $F$ es la fuerza, en newton, que hace el campo sobre ella. La dirección de la fuerza es perpendicular a la inducción y a la velocidad; y su sentido es aquél en el que avanzaría un sacacorchos, si se lo hiciese girar desde una flecha que represente la velocidad, hacia otra que indique la inducción.

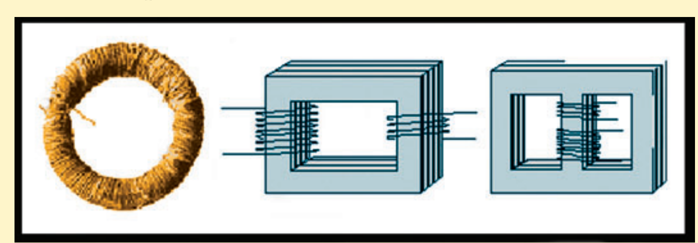
Como la fuerza magnética es perpendicular a la velocidad de la partícula, la acelera lateralmente, sin que su velocidad aumente ni disminuya.



Truco para suprimir interferencias. La corriente de 50 Hz pasa sin dificultades, porque varía lentamente. Las corrientes de frecuencias mucho mayores y que varían más rápidamente, inducen gran fuerza contraelectromotriz, y no pasan. El anillo es de ferrita.

## El transformador

Uno de los más ingeniosos inventos de Michael Faraday, de importante valor teórico en su época, y de gran utilidad tecnológica en todos los tiempos, es el *transformador eléctrico*, la aplicación más directa de la inducción estática.

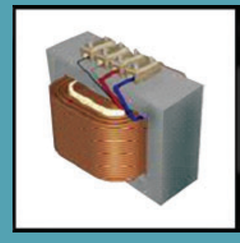


**A la izquierda, el primer transformador de la historia, hecho por Faraday con un rollo de alambre de hierro y dos bobinados de alambre de cobre aislado en algodón. Al centro, esquema de uno actual, llamado transformador de núcleo en anillo. A la derecha, uno de mejor diseño, el transformador de núcleo acorazado.**

Los transformadores se emplean sólo en corriente alterna y tienen uno o más devanados. Los de alimentación se llaman primarios; y los de salida, secundarios. En ciertas aplicaciones de alta tensión, hay también una bobina terciaria.

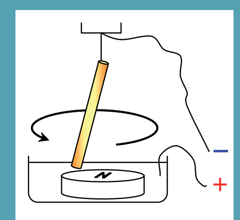
Las variaciones de corriente en el primario hacen que el flujo magnético que comparten las bobinas varíe; y eso induce fuerzas electromotrices en ellas.

La ***relación de transformación*** entre la tensión de entrada y la de salida, es la que existe entre los números de vueltas, o espiras, de los bobinados. Por ejemplo, un transformador con un primario de mil vueltas, y un secundario de quinientas,



Transformador de núcleo acorazado, con uno de los bobinados arrollado por afuera del otro. El de alambre grueso es el de tensión más baja, y corriente mayor.

sirve como transformador de 220 V a 110 Vca. Las corrientes están en relación inversa a la de las tensiones. En este ejemplo, cuando la corriente primaria sea de 1 A, la secundaria será de 2 A. Así la potencia, igual al producto de la tensión por la intensidad, es la misma, idealmente, a la entrada y a la salida. En la práctica hay algo de pérdida en forma de calor.

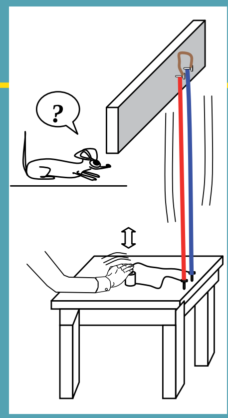


- El primer motor electromagnético de la historia, lo inventó Michael Faraday. Sumergió un imán en mercurio, colgó una varilla metálica que hiciese contacto, y le hizo pasar corriente.

## • Motores rotativos

El primer motor electromagnético de la historia fue, como el transformador, también, un invento de Faraday. Desde entonces, se han hecho muchos avances que permiten construir motores de corriente continua y alterna, algunos sin contactos que rocen, y alimentar estos con fuentes de frecuencia variable, con lo que se consigue controlar la velocidad entre límites extremos, desde una vuelta por hora, hasta miles de revoluciones por minuto.

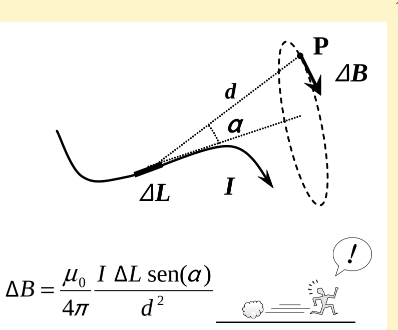
El principio de funcionamiento del motor electromagnético permaneció inalterado desde mediados del siglo XIX: Se produce –con imanes o bobinas– un campo magnético y se hace pasar corriente por un conductor.




- La inducción magnética de un conductor por el que circule corriente ejerce una fuerza sobre otro conductor vecino, por el que también circule corriente. Eso se puede experimentar con una pila y dos cables que cuelguen paralelos y muy cercanos entre sí.

## • Inducción magnética de una corriente

Imaginemos un conductor por el que circula una corriente $I$, que genera un campo magnético en las proximidades. En cada punto del espacio, por ejemplo en $P$, cada pequeña parte del conductor, $\Delta L$, contribuye en una cantidad $\Delta B$ a la a la inducción, o densidad de flujo.




$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\ \Delta L\ \text{sen}(\alpha)}{d^2}$$

La **ley de *Biot* y *Savart***, llamada así en honor de dos científicos franceses (uno de ellos cirujano) establece cuánto vale esa contribución:

$\Delta B$ es el aporte de inducción, en tesla, del fragmento de conductor de longitud $\Delta L$, en metros. El factor $\frac{\mu_0}{4\pi}$ es una constante igual a $10^{-7}$ tesla metro sobre ampere,[5] $I$ es la corriente que circula, en ampere; d, en metros, es la distancia entre

[5] La parte $\mu_0$ de esa constante se llama *permeabilidad magnética del vacío*, y vale $4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A. Recordemos, del capítulo 1, que $\varepsilon_0$ es la permitividad dieléctrica del vacío. El sabio escocés James Clerk Maxwell, una de las mentalidades científicas más brillantes de la historia, descubrió, en 1864, que debían existir ondas electromagnéticas, y que su velocidad de propagación sería la inversa de la raíz cuadrada del producto $\mu_0\ \varepsilon_0$; y eso da... ¡la velocidad de la luz! Maxwell unificó así la óptica con el electromagnetismo. Mientras pensaba, lápiz en mano, dónde podía hallar ondas electromagnéticas, esas ondas estaban iluminando el papel donde escribía.

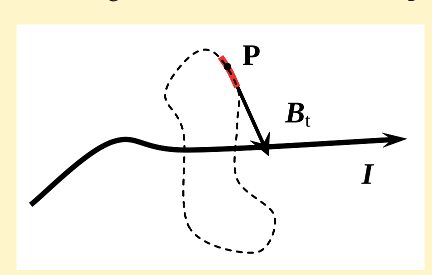



el fragmento de conductor y el punto del espacio en el que se calcula la inducción. Y sen(α) (seno de alfa) es el seno del ángulo marcado en la figura.[6]

En el caso de un conductor recto y muy largo –idealmente infinito– como el de una línea aérea de alta tensión, la aplicación de esta ley lleva al resultado de que la inducción magnética a una distancia *d* de la línea vale $B = 2\times10^{-7}$ T.m/A. × I/d. Por ejemplo, para 1.000 A y 12 m, que son valores típicos, la inducción vale 16,7 microtesla, menos que la del campo magnético terrestre.

## • Ley de Ampère

La ley de Ampère, al igual que la de Biot y Savart, también relaciona la inducción magnética con las corrientes, pero en vez de considerar las contribuciones a la inducción de cada parte de un conductor, da una descripción integral del efecto.



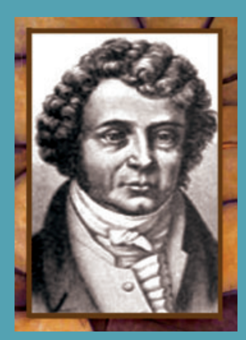

Imaginemos una curva cerrada cualquiera que rodee un conductor por el que pasa una corriente I. Dividamos esa curva en fragmentos pequeños de longitud $\Delta L$ (como el marcado en color), multipliquemos cada una de esas longitudes por el valor de la componente tangente a la curva, $B_t$ de la inducción *B* en ese lugar, y sumemos todos esos productos. La ley de Ampére establece que el resultado es igual al producto de la corriente, por la permeabilidad magnética del vacío (mu sub cero).

$$\sum B_{ti}\,\Delta L_i = \mu_0 I$$

La letra griega sigma mayúscula significa suma, y los subíndices *i* representan cada uno de los términos de la suma.

Por ejemplo, si trazamos una circunferencia de 12 m de radio alrededor de la línea de alta tensión ya mencionada, la longitud de esa curva imaginaria será de 75,4 m. A igual distancia de la línea, la inducción tendrá el mismo valor, calculado antes, de 17 microtesla. Se cumple la igualdad $16{,}7 \times 10^{-6}$ T × 75,4 m = $4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A × 1.000 A, lo que corrobora que el resultado predicho por la ley de Biot y Savart coincide con el de la ley de Ampère.

[6] Esta proposición es puramente teórica. Es imposible conseguir que circule corriente sólo por una pequeña parte de un conductor; por eso la ley de Biot y Savart sólo se corrobora a través de sus consecuencias integrales.



• André-Marie Ampère (1775–1886) aprendió latín por su cuenta para leer los libros de la biblioteca de Lyon, su ciudad natal. Enseñó matemática, e investigó el magnetismo. Podría haber avanzado más, si no hubiera abandonado sus trabajos durante unos años, cuando su padre, juez de paz, murió en 1793, víctima del Terror.

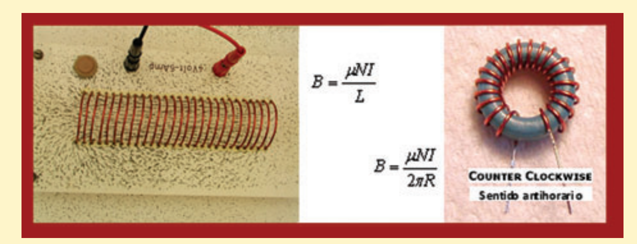



• Cabeza grabadora de disco rígido, cuyo núcleo tiene una permeabilidad magnética 800.000 veces mayor que la del vacío.
El cociente entre la permeabilidad $\mu$ de un material, y la del vacío, $\mu_0$, es la *permeabilidad relativa*, que no lleva unidades. La del hierro común es de 5.000. La del hierro silicio de grano orientado, de 20.000.

Las leyes enunciadas valen en el vacío. Para extenderlas a medios cualesquiera, por ejemplo el hierro, o la ferrita, reemplazamos $\mu_0$, la permeabilidad del vacío, por $\mu$, la permeabilidad particular que tenga ese material.

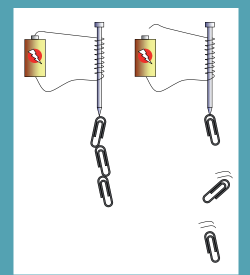
## • Campo magnético de una bobina

La inducción que genera una bobina por la que pasa corriente depende de la forma de la bobina. Las más comunes son las solenoides, y las toroides.[7]




**• Izquierda, solenoide; derecha, toroide. La inducción en el centro del solenoide, o en cualquier punto del interior del toroide, es *B*, en tesla. L es la longitud de la solenoide; *R*, el radio del toro. N es el número de vueltas arrolladas, sin unidades; y $\mu$ es la permeabilidad magnética el material (la del aire es muy cercana a la del vacío).**

## • Inducción, permeabilidad e intensidad de campo



• Electroimán. La corriente eléctrica que pasa por la bobina magnetiza el clavo, que atrae los clips. Cuando la corriente cesa, el clavo se desmagnetiza casi por completo.

La forma más sencilla de estudiar estos conceptos es en el caso de la bobina toroide con núcleo magnético, también llamada *anillo de Rowland*, cuya inducción en cualquier punto de su núcleo se calcula como vimos:

$$B = \frac{\mu NI}{2\pi R}$$

Acomodaremos los términos de las ecuaciones y definiremos nuevas magnitudes; y eso puede parecer confuso si se ignora su propósito, que es el de alcanzar una interpretación más sencilla e intuitiva del magnetismo.

Multipliquemos a izquierda y derecha por la sección transversal del núcleo, s, expresada en metros cuadrados. El producto B.*s* es el flujo magnético, Φ.

Por otra parte, el producto N.I expresado en ampere vueltas (o directamente en ampere, porque las vueltas carecen de unidades), se llama *fuerza magnetomotriz*. Y a la longitud del desarrollo del toro, *2πR, dividida por la sección y por la permeabilidad, se la define como la reluctancia*. Queda entonces una expresión muy sen-

[7] *Solenoide* significa de forma tubular, como el resorte del lomo de un cuaderno. Toroide, recordemos, significa con forma de toro, un cuerpo geométrico semejante a una rosquilla, o a un salvavidas.

cilla, que se parece a la ley de Ohm de la electricidad, pero que se aplica al magnetismo:

$$\Phi. = F \ / \ R,$$

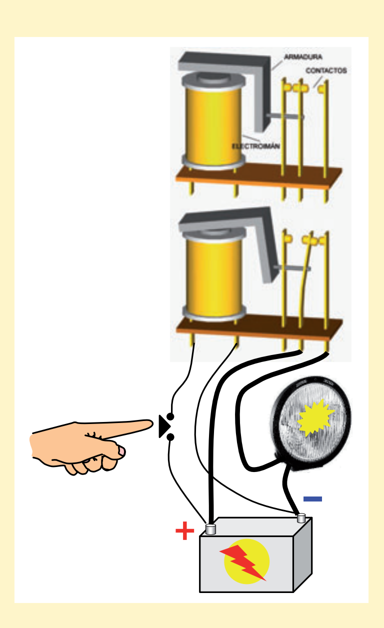
Se lee: *el flujo es igual al cociente entre la fuerza magnetomotriz*, y la reluctancia, la primera se mide en ampere vueltas, la segunda, en uno sobre henry, o $H^{-1}$.

El número de ampere vuelta, dividido por la longitud del circuito magnético, es la *intensidad de campo magnético*, H: Tenemos, entonces,

$$B = \mu H$$

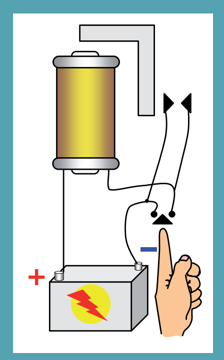
La última fórmula nos dice que a igual intensidad H de campo magnético aplicado, cuanto mayor sea la permeabilidad magnética del medio, $\mu$, tanto mayor será la inducción, o densidad de flujo, *B*.

## Relés electromecánicos; circuito autoalimentado




Una aplicación de la inducción magnética, casi tan importante como la del motor y la del transformador, es la del relevador electromecánico, o *relé*. Es una variante del *electroimán*, en la que la fuerza magnética, en vez de abrir una puerta, o cargar objetos, establece –o abre– un contacto eléctrico diferente del que se hace para hacer circular corriente por su bobina.[8] De esa manera, por ejemplo, las luces y bocina de un coche, que necesitan una corriente grande, se pueden manejar con una corriente mucho menor, la de la bobina del relé, con una llave pequeña en el tablero.[9]

Hay relés con varios juegos de contactos, algunos que se cierran cuando se alimenta la bobina; otros que, en cambio, estaban ya cerrados, y se abren cuando actúa el relé. Esos contactos se llaman *NA* y *NC*, normalmente abiertos y normalmente[10] cerrados.



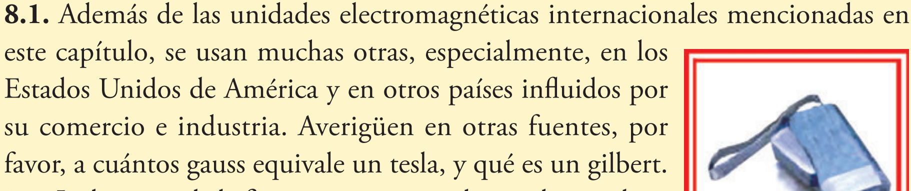
Relé autoalimentado. Cuando se aprieta el botón, actúa el contacto. Pero si se suelta el botón, el relé queda tomado, hasta que alguien desconecte la batería. Así, cuando la energía eléctrica vuelve después de un corte, las máquinas no arrancan solas, y hay que apretar otra vez el botón para que se pongan en marcha.

8 En la jerga eléctrica, esos contactos independientes y libres de potencial y, que por eso, se los puede usar libremente en un circuito, se llaman *contactos secos*.

9 Cuando accionamos las luces altas y bajas en algunos modelos de coche, en un ambiente silencioso, se oye el ruido del relé cuando actúa. Algunos modelos nuevos usan relés de estados sólido, dispositivos electrónicos que carecen de piezas móviles.

10 La normalidad, en este contexto, consiste en que la bobina del relé no se encuentra alimentada. Comentemos, de paso, que en electricidad *cerrado* significa conectado; y abierto, desconectado, en el mismo sentido que cuando se dice que una idea no cierra, o sea que no establece conexión con otras. Pero este significado eléctrico es opuesto al del lenguaje vial: abierto al tránsito es que se puede pasar; y cerrado, que no hay circulación de vehículos.

## Propuestas de estudio



**8.1.** Además de las unidades electromagnéticas internacionales mencionadas en este capítulo, se usan muchas otras, especialmente, en los Estados Unidos de América y en otros países influidos por su comercio e industria. Averigüen en otras fuentes, por favor, a cuántos gauss equivale un tesla, y qué es un gilbert.



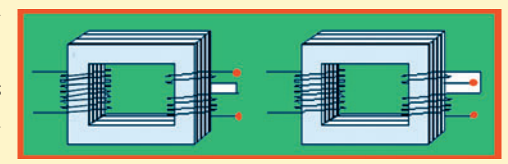
**8.2.** La linterna de la figura recarga sus pilas mediante el accionamiento manual de la palanca. ¿Qué se puede imaginar sobre su principio de funcionamiento?

$$B = 2\ \frac{\mu_0 I}{4\pi\ d}$$

**8.3.** La fórmula de arriba, da la fuerza que se ejercen dos cables paralelos de longitud L, distantes una distancia d, por los que circula una corriente I, en el supuesto de que el largo de los conductores sea bastante mayor que la distancia que los separa. En un cortocircuito a la salida de un generador de una central, la corriente alcanza los 200.000 A. Si los conductores de salida hasta el transformador midiesen veinte metros de largo, y distaran entre sí un metro, ¿cuánto valdría la fuerza entre esos conductores, en caso de corto?

**8.4.** Esta propuesta es difícil, porque tiene infinitas respuestas posibles; entonces hay que tomar decisiones, e inventar alguno de los datos faltantes; en eso consiste su dificultad. Diseñen un solenoide que, cuando se le hace circular cien miliampere, produzca en su centro una inducción semejante a la terrestre, de 16 microtesla.

**8.5.** Los primarios de estos transformadores se alimentan con 100 V. ¿Qué valor de tensión hay entre los puntos de color del primer transformador? ¿Y en el segundo?





- Aún después de finalizada la Segunda Guerra Mundial, los grandes barcos llevaban a bordo técnicos que se ocupaban de neutralizar la inducción del campo terrestre, mediante la circulación de una corriente eléctrica apropiada por bobinas que rodeaban la nave. La operación se llamó *desgaussaje*, y servía para disminuir la eficacia de las minas explosivas. El gauss es una unidad de inducción, o de densidad de flujo.

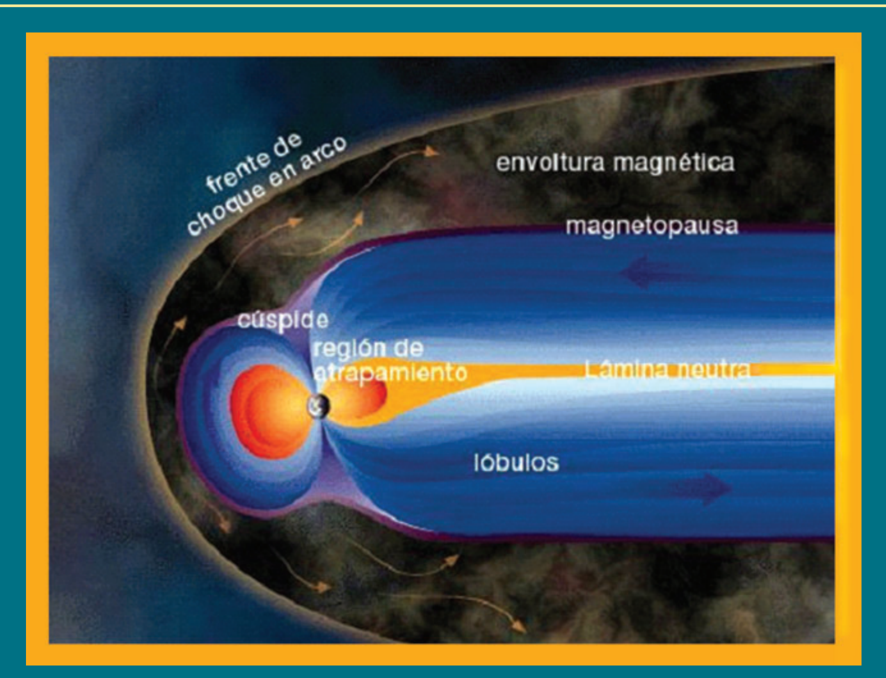


- Nicola Tesla (1856–1943), nacido en la Serbia del Imperio Austrohúngaro, desarrolló un aparato de inducción, hoy conocido como *bobina de Tesla*, que genera alta tensión. Su invento se usa hoy en el encendido de chispa de los motores de nafta.

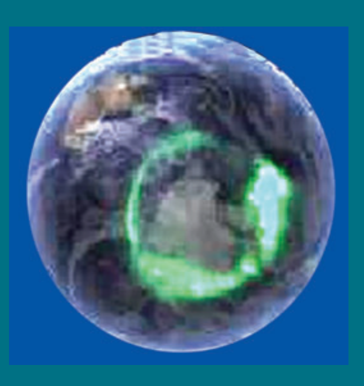
## Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en Internet con las palabras electromagnetismo, elemental, Faraday y Maxwell.
- Hay un material destinado a docentes, pero accesible, en este sitio del INET *http://www.inet.edu.ar/mat_serie_colecc.asp?ID=7*. Se piden los motivos de consulta, y el registro, que es gratuito.
- Fracsis Bitter, *Imanes*, Eudeba, Buenos Aires, 1960. Contiene interesantes datos históricos.

# Aplicaciones científicas, industriales y domésticas del magnetismo




● En el medio de la figura está la Tierra, nuestro planeta. En la imaginación, fuera del dibujo en escala, una cuadra a la izquierda, y de un metro de diámetro, el Sol. En colores, el campo magnético terrestre.
Se investiga todavía a qué se debe ese campo. Tiene que ver, sin duda, con la rotación diaria de la Tierra; posiblemente también con su núcleo ferroso, y con las partículas cargadas del viento solar, que la fuerza de Lorentz desvía en todas partes menos en los polos, donde entran como por embudos, ionizan el aire y generan las auroras polares.



● La aurora austral, fotografiada desde el espacio. En la parte más alta de la atmósfera, la presión del aire es la misma que en el interior de un tubo fluorescente; y el fenómeno al que obedece el fulgor, muy similar (arriba, a la izquierda, Oceanía.)

# Aplicaciones científicas, industriales y domésticas del magnetismo



Demostraciones magnéticas de William Gilbert, ante la Reina de Inglaterra y miembros del Parlamento.




Un GPS, del tamaño de un celular, recibe señales de tres o cuatro satélites. Según sus demoras, determina las coordenadas locales con una precisión de cinco metros.

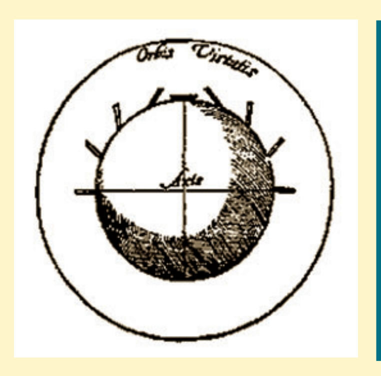


El girocompás es un motor con un volante montado en tres aros, uno dentro de otro, para que su eje de rotación se mantenga fijo, aunque la base del aparato gire con la nave.

Los avances científicos, rara vez, resultan del esfuerzo individual, ni siquiera en las épocas más antiguas. Los científicos de mayor renombre que recuerda la historia pertenecieron a academias, universidades y cortes, o recibieron el apoyo de familias ricas, emperadores y reyes; sea porque retribuían los recursos con resultados prácticos inmediatos que se pudieran aplicar a la paz o la guerra, o, porque el verdadero poder siempre supo que el cultivo de las artes y las ciencias lo afianza y, tarde o temprano, cosecha de ellas bienes de los que no sospechaba su existencia.

La Reina Isabel I de Inglaterra instruyó, directamente, a su médico personal, William Gilbert (1544–1603) para que aprovechase sus conocimientos de física en el diseño de mejores brújulas e instrumentos de navegación, que necesitaban los barcos de la Armada para la guerra contra España.[1]

Gilbert la obedeció y dedicó, después, su vida al estudio del magnetismo. Perfeccionó varios instrumentos y construyó unas brújulas que, además de indicar la dirección geográfica, marcaban la inclinación vertical del magnetismo local. Elaboró una teoría sobre el campo magnético terrestre que, aunque era errada, resultó útil para la navegación marítima, y motivó el inicio de nuevos trabajos de otros investigadores.




**Una terrella de Gilbert. La bola de barro seco tiene un imán en su interior. Los alfileres revelan las líneas de campo, e ilustran el concepto de *inclinación magnética*, mayor cerca de los polos. Terrella, en latín, significa Tierra pequeña.**

[1] A Isabel I la llamaron la Reina Virgen. En el contexto político de su época, virgen significaba soltera y sin hijos. Resistió la presión del Parlamento para que se casase y diese descendencia al trono; se supone que para evitar que un cónyuge disminuyese el poder de mando directo que había consolidado.

Gilbert consideraba a la Tierra como un gigantesco imán[2] y, con trozos de magnetita envueltos en arcilla, construyó modelos a escala, que llamó *terrellas*. Con ellas demostró que, aunque el campo magnético es más intenso cerca de los polos, resulta menos útil para la orientación. Las brújulas, en los polos, *enloquecen*, como dicen los navegantes.

En la actualidad, la orientación magnética de las naves marítimas y aéreas cayó en desuso. La brújula, o compás magnético, aunque se lleva a bordo para que ayude en emergencias, se reemplaza por el girocompás, y por el sistema de posicionamiento global, GPS.

En la actualidad, las investigaciones básicas y aplicadas superan en mucho las de los siglos anteriores, al extremo de que ya no hay trabajos importantes a cargo de una sola persona, o de pocas. Por ejemplo, el premio Nobel de Medicina de 1979 se otorgó, en conjunto, al físico Allan M. Cormack, y al ingeniero electrónico Godfrey N. Hounsfield, por su desarrollo del tomógrafo axial computarizado. Ese aparato, tiene poco que ver, directamente, con el magnetismo, pero dio lugar a una muy útil herramientas de diagnóstico médico: la *tomografía axial computarizada de resonancia* ***magnética*** *nuclear*, largo e impresionante nombre que explicaremos enseguida. Por el desarrollo de ese instrumento, el químico Paul C. Lauterbur y el físico Sir Peter Mansfield obtuvieron el Premio Nobel, también el de Medicina, en 2003.

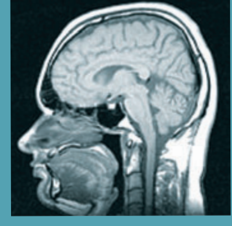


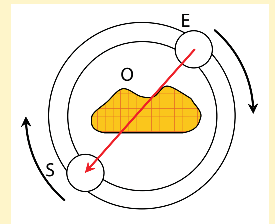
Imagen del cerebro obtenida sin rayos X, con la técnica de la tomografía computada de resonancia magnética nuclear.

## Tomografía axial computarizada

La *tomografía*, de *tomo*, cortar, y *grafo*, dibujo, es la obtención de imágenes internas de un cuerpo, como si se lo cortara en rebanadas. *Axial* significa en la dirección del eje. En el caso de un paciente, las rebanadas gráficas corresponden a cortes perpendiculares al eje mayor del cuerpo.[3] Computarizar es calcular con computadora.



A diferencia de las radiografías comunes que obtienen imágenes de una vez por transparencia fotográfica a los rayos, las de la tomografía computada resultan de explorar el cuerpo con haces delgados de radiación, en muchas direcciones cruzadas. El






¡Resuelvan esas cien mil ecuaciones en una milésima de segundo!

[2] Si bien nuestro planeta se comporta como un imán en algunos aspectos, hoy sabemos que la Tierra no tiene un magnetismo permanente, ni lo podría tener, ya que su núcleo, que es de hierro, se encuentra a 4.500°C, temperatura mucho mayor que la de Curie para ese metal.

[3] Es casi innecesario aclarar que el paciente queda entero después de este examen. No se lo corta verdaderamente; sólo se obtienen imágenes internas de su cuerpo, que resultan de mediciones y de cálculos.

emisor rotativo **E** de la figura emite, por ejemplo, rayos X, que atraviesan el objeto **O**, y recibe, disminuidos en su intensidad, el sensor **S**, enfrentado con el emisor, y también giratorio.

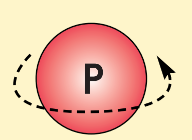
Se supone esa sección del objeto dividida en regiones imaginarias, por ejemplo celdas cuadradas de un milímetro. Cada celda que atraviesa el rayo, según su opacidad a los rayos X, contribuye a atenuarlo. Si el rayo se aplicara en una sola dirección, no se sabría cuál fue la contribución a esa atenuación de cada una de las celdas individuales que atravesó el rayo en su camino. Pero si el haz gira, o se traslada, barre el objeto; y con eso se obtienen, por ejemplo cien mil datos. Se pueden plantear entonces cien mil ecuaciones con cien mil incógnitas, resolverlas matemáticamente, saber qué hay dentro del objeto, y representarlo gráficamente.

El matemático J. Radon ya había resuelto ese atractivo problema en 1925, e incluyó el tratamiento de las inevitables imprecisiones de medición y de cálculo. Pero para llevar su idea a la práctica, hubo que esperar hasta 1980, cuando se desarrollaron computadoras apropiadas.

La técnica descrita es invasiva, porque el exceso de rayos X daña los tejidos humanos. Pero en pocos años la tomografía computada se asoció con otra herramienta de diagnóstico que no usa radiaciones peligrosas, ni daña los tejidos, y se basa en una propiedad magnética de las partículas atómicas que componen el objeto de estudio. Es la RMN (NMR en inglés), *resonancia magnética nuclear*.

## Resonancia magnética nuclear

Los elementos químicos que, como el de hidrógeno, tienen un único protón en sus núcleos, o un número impar de ellos (como el carbono 13, o el fósforo 31), tienen un espín diferente de cero. El espín es una propiedad de las partículas que la física cuántica asocia con un movimiento de giro.







Las partículas cargadas que giran se comportan como pequeños imanes, o dipolos, y se orientan en presencia de un campo magnético. En esas condiciones, con los espines orientados en el campo, se aplican ondas electromagnéticas al objeto que se estudia. Según la frecuencia de estas ondas, los núcleos las absorben, o las dejan pasar. La frecuencia exacta a la que ocurre la absorción depende de lo que haya en las vecindades de los núcleos, por ejemplo otros núcleos de otros átomos, iguales o diferentes. Así, con el estudio de la absorción de la radiación de diferentes frecuencias, se sabe qué sustancias químicas hay en cada punto de una muestra.

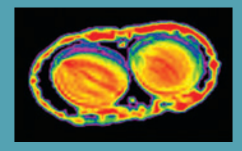


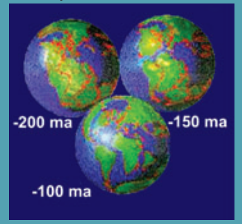
Imagen de resonancia magnética nuclear de dos semillas de colza, de las que se obtiene aceite comestible. Los colores indican la concentración de agua y de aceite después del secado.

Como los tejidos no sufren daños, que se sepa, por los campos magnéticos, ni por las radiaciones empleadas, de frecuencia relativamente baja, la técnica de tomografía axial computarizada de resonancia magnética nuclear permite diagnósticos que no causan los daños que sí pueden producir las ondas electromagnéticas ionizantes y de frecuencias altas, como los rayos X. Esta técnica revolucionó el diagnóstico médico y, hoy, todos los centros importantes de salud tienen uno o más de esos aparatos, o trabajan en colaboración con otro instituto que los tenga.

## Campo magnético terrestre

El estudio del campo magnético de la Tierra tiene hoy mucha menos utilidad para la navegación, que la de hace un siglo. Pero han surgido, desde entonces, nuevos motivos de interés en su estudio. Uno de ellos es el del cambio climático,[4] fenómeno por el cual la temperatura global del planeta parece estar aumentando; casi, seguramente, como consecuencia de las actividades humanas, en particular, la quema de combustibles fósiles. Por eso crece el interés científico en el pasado de la Tierra y en conocer las temperaturas en cada época y las causas de sus variaciones, para saber si esto que está ocurriendo en los últimos dos o tres siglos, ya ha pasado antes o no. Se investiga si influyen los cambios en la actividad solar; y, en caso afirmativo, de qué depende el retorno a la normalidad. Una variable, posiblemente, muy vinculada con la actividad solar es el campo de la Tierra, por eso resulta de interés saber cuánto valía la inducción magnética terrestre en cada época, cuáles eran su dirección y sentido, y dónde se encontraban, entonces, los polos, en relación con los continentes.

Migración del Polo Norte en 3.000 millones de años. Esa representación es discutible, porque en mucho menos tiempo el mapa ha cambiado.



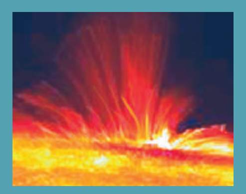

## Paleomagnetismo

El paleomagnetismo es el estudio del campo magnético terrestre en el pasado. Ese dato se puede conocer gracias al pequeño magnetismo permanente que adquirieron algunas rocas sedimentarias en el momento de su formación, cuando a partir de un barro o suspensión en agua, sus partículas se depositaron mientras se hallaban sometidas al campo terrestre de la época. El examen microscópico de esas rocas, y la medición de su magnetismo con un magnetómetro, dan indicios de la dirección, el sentido y la inducción del campo magnético antiguo.

[4] Se discute, en medios científicos, la verdadera magnitud del llamado cambio climático, desde las hipótesis más moderadas, hasta las catastróficas. Se estima que en el transcurso de este siglo, el mar subirá entre veinte centímetros y un metro.



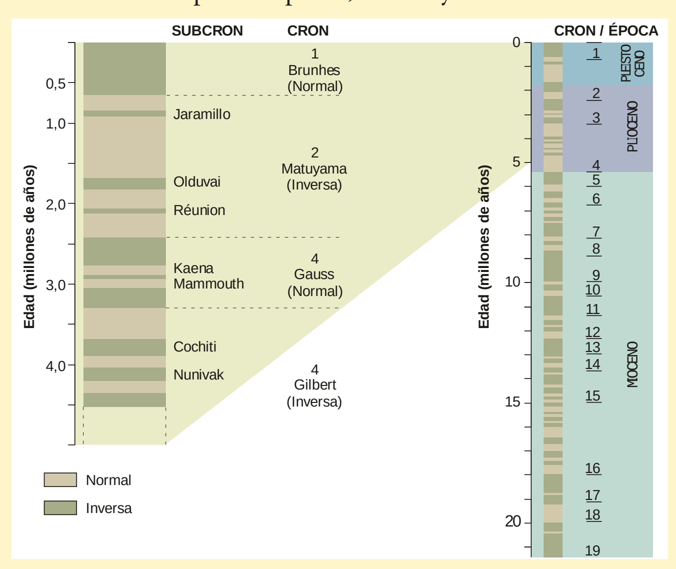
- Colocación de una muestra de roca en un magnetómetro, para determinar la dirección y sentido del campo terrestre en épocas pasadas.



- El Sol y los planetas tienen, igual que la Tierra, un campo magnético.
Desde que su padre le regaló una brújula cuando era niño, Albert Einstein consideró la explicación del magnetismo terrestre como uno de los grandes misterios de la ciencia. Muchos científicos aceptan hoy la teoría de la *dínamo*, que atribuye el campo magnético de la Tierra al movimiento del metal líquido del núcleo. Otros investigadores le otorgan importancia a la carga eléctrica de nuestro planeta, resultante del bombardeo de partículas provenientes del Sol.

Los magnetómetros primitivos eran simples balanzas, que medían miligramos de fuerza de atracción. Hoy se usan otros mucho más sensibles, llamados SQUID, sigla en inglés de *dispositivo de interferencia cuántico superconductor*. Consisten en un anillo superconductor adelgazado en uno o dos sitios, por donde la corriente circula por efecto túnel (el capítulo 2 hace referencia a ese fenómeno cuántico). Esa circulación es muy sensible al magnetismo y, con ese aparato, se detectan campos de intensidad, miles de veces, inferiores a la del terrestre.

Los resultados de esas determinaciones muestran que el campo magnético de nuestro planeta se invierte erráticamente, según indica la figura.[5] Como se acostumbra en geología, el pasado se representa abajo, y el futuro arriba, en el mismo orden en el que se depositan los sedimentos. Los investigadores llaman polaridad normal a la actual, e inversa a la opuesta, y creen ver tendencias temporales, por lo que clasificaron los tiempos en épocas, crones y subcrones.



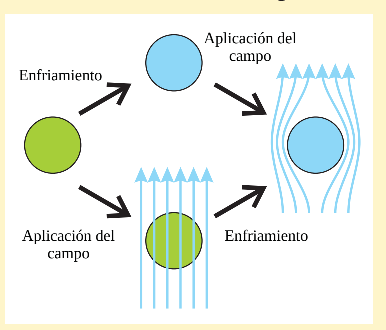

## • Efectos de un superconductor en un imán, y el recíproco

En el capítulo 6 mencionamos la propiedad fundamental de un superconductor, que es la de tener una resistencia eléctrica nula. A continuación agregamos que, ese útil comportamiento, reconoce límites. Uno está dado por la inducción magnética *máxima* que es capaz de soportar el material sin perder su condición de superconductor. Otro límite, muy relacionado con el que se acaba de mencio-

[5] Los humanos de la especie *homo sapiens* todavía no vivimos ninguna de esas inversiones. Pero nuestros antecesores y sus contemporáneos llegaron a experimentar tres o cuatro, aparentemente sin consecuencias. Se avecina, quizás, una inversión, porque el campo terrestre disminuyó un diez por ciento en el último siglo y medio.

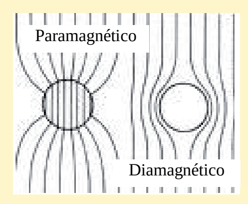
nar, es que la densidad de corriente que circula por el material, en ampere por metro cuadrado, también tiene que estar *por debajo* de un cierto valor, el cual depende del tipo de material superconductor. Si la inducción magnética a la que se somete el material, o la densidad de corriente que lo atraviesa, son demasiado elevadas, el material deja de ser superconductor.[6]

Otra propiedad de los superconductores, es el *efecto Messnier*. Consiste en que un superconductor que se encuentre sometido a condiciones que no excedan los límites mencionados, expulsa de su interior todo vestigio de campo magnético.

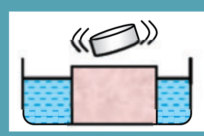



**Efecto Messnier. En azul, el material frío; en verde, más caliente. Arriba: si se enfría un material hasta hacerlo superconductor, el campo magnético que se le aplique, no lo penetra. Abajo: si el campo magnético se aplica antes, entonces después, cuando el material se enfría y se vuelve superconductor, expulsa el campo magnético que había en su interior.**

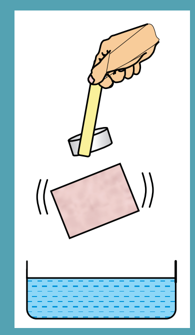
Los materiales paramagnéticos y ferromagnéticos, como la llave de la foto, *concentran* las líneas de campo en su interior. Los diamagnéticos, por el contrario, *separan* las líneas. Los superconductores actúan como materiales diamagnéticos perfectos, porque no permiten ningún magnetismo en su interior.





En las demostraciones con superconductores hacen levitar un imán sobre el superconductor enfriado en nitrógeno líquido. Es menos conocido el efecto opuesto: se toma el imán, y se iza el superconductor, sin contacto físico.



## Aplicaciones de la superconducción

La aplicación práctica más común de los superconductores en la actualidad, es la de producir, con grandes corrientes eléctricas, campos magnéticos intensos para los tomógrafos de resonancia magnética nuclear y para la levitación magnética de ferrocarriles de alta velocidad. Se experimenta la fabricación de circuitos integrados superconductores, de velocidad de procesamiento de datos mayor que los actuales de silicio; y no se descarta que en el futuro, en vez de almacenar la energía eléctrica de los coches en baterías químicas, esa energía se almacene en forma de corriente muy intensa que circule por un superconductor, sin ninguna resistencia, y que esté siempre ahí disponible para cuando se la necesite, por ejemplo, para poner el ve-



Superconductores de alta temperatura de segunda generación (2G HTS ), desarrollados y puestos en venta en 2005 por la *American Superconductor*. Les agregan unas partículas muy pequeñas que aumentan la densidad de corriente crítica.

[6] Ese límite indeseable se aprovecha, sin embargo, para construir magnetómetros SQUID, mencionados en este capítulo.

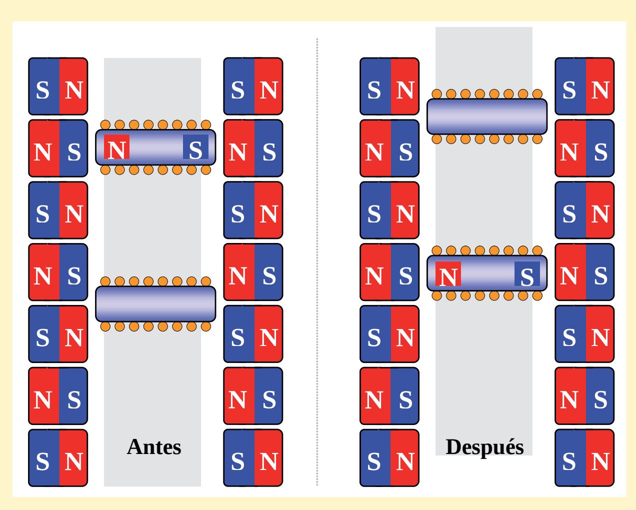
hículo en marcha. Más difícil es la transmisión de la energía eléctrica que producen de las centrales, por cables superconductores.

## Motores lineales



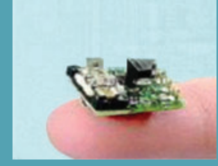
Motores lineales fabricados por la Copley Controls Corp. Alcanzan una aceleración de dos gravedades y media, y tienen una precisión de un micrón. Para evitar el desgaste, la parte móvil desliza por flotación magnética sobre la fija. Se los usa en escáneres de computadoras, y otras aplicaciones.

Los primeros motores eléctricos fueron los rotativos y servían para hacer funcionar molinos, ventiladores, piedras abrasivas y ruedas de vehículos. Pero, en muchas operaciones industriales, los movimientos que se requieren son de traslación y no de rotación; entonces, se usan motores lineales, cuyo principio de funcionamiento es semejante al de los motores rotativos. Un motor lineal se puede imaginar como un motor rotativo desarrollado en una línea.

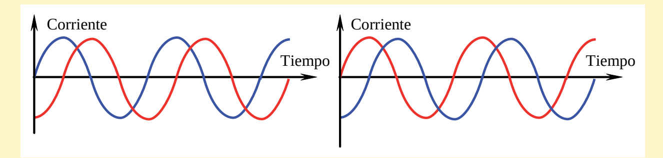



La figura muestra el principio de funcionamiento de un motor lineal. Por simplicidad se representan sólo dos de las bobinas con núcleo de hierro, montadas en el carro móvil. **Izquierda**: se hace circular corriente por la bobina de arriba que, entonces, se atrae con los imanes vecinos, y se acomoda en línea con ellos. Por la otra bobina no pasa corriente. **Derecha**: se desconecta la bobina de arriba y se conecta la de abajo, con la misma polaridad; entonces la bobina de abajo sube medio paso, junto con la otra y con el carro al que están sujetas. Y así, sucesivamente, con los cambios de polaridad adecuados, se hace avanzar el carro en forma continuada, o, bien, paso a paso, si eso es lo que se necesita.

Una manera de conseguir un avance continuo y no tembloroso o de a saltos, es alimentar las bobinas con corrientes alternas *en cuadratura*, esto es, desfasadas en el tiempo un cuarto de período.



Motor lineal de 8 mm de carrera , usado en el reconocimiento óptico de los caracteres impresos de un texto. Pero no usa principios magnéticos, sino un material *piezoeléctrico*; el mismo de las alarmas de relojes y encendedores de chispa, que cambia levemente de tamaño cuando se le aplica tensión.

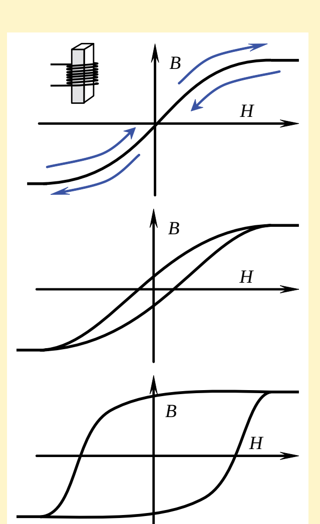



● **Alimentación desfasada. A la izquierda, la corriente representada en rojo está atrasada con respecto a la indicada en azul. A la derecha ocurre lo opuesto. Con ese cambio se consigue que el motor lineal avance, o que retroceda.**

Los motores lineales se usan en muchas aplicaciones, entre ellas los tomógrafos, los escáneres de computadoras, la robótica, y en máquinas herramienta que trasladan la plataforma móvil a la que se fija la pieza que se trabaja. Un motor lineal impulsa la plataforma, que hace pasar la pieza frente a herramientas giratorias que la agujerean, la desbastan, la rectifican, o le hacen otras operaciones.

## ● Histéresis magnética

En el capítulo anterior mencionamos dos magnitudes, designadas con las letras *H*, y *B*; que son, respectivamente, la intensidad de campo y la inducción magnética; la primera medida en ampere vueltas por metro, y la segunda en tesla. Para caracterizar un material magnético es útil representar una de esas magnitudes en función de la otra.




Podemos interpretar la curva a partir del origen, cuando no circula corriente por la bobina, y el material no adquirió aún inducción. Aumentamos la corriente y aumenta la inducción. Pero llega un momento en que, aunque se aumente más la corriente, la inducción no crece más; se dice entonces que el material se *satura*. Cuando la corriente cambia de sentido, repetidamente, la inducción puede repetir los valores, en tal caso el material es bueno como núcleo de un transformador.

En la práctica, el camino de regreso es diferente del de ida, y se dice que el material presenta *histéresis*[7] magnética. La curva se llama *lazo de histéresis*. Los materiales que presentan gran histéresis se calientan cuando se los usa como núcleos de transformadores.



● Refrigerador magnetocalórico, patentado en Suiza. Consigue de 10 a 15 grados de enfriamiento, con imanes de sólo dos tesla de inducción.



● Detector de gas, desarrollado en Grecia, basado en la diferente velocidad del sonido en cada gas, medida con un resonador magnetoelástico. El gas pasa a la cámara de detección a través de una membrana selectiva de materia porosa, la zeolita, que sólo deja pasar el gas que interesa, y no otros, ni los gases del aire.

[7] *Histéresis* significa retraso, y tiene la misma raíz que *historia*. *Histeria*, en cambio, es una enfermedad nerviosa que antiguamente se la creía relacionada con la matriz femenina, cuyo nombre griego es hyster.

Si se desea que el material conserve su magnetización, conviene usar uno de gran histéresis, cuyo lazo se aproxime mucho a un rectángulo.

Estas características opuestas son apropiadas, respectivamente, para la fabricación de transformadores e imanes permanentes.

## Materiales magnéticos especiales

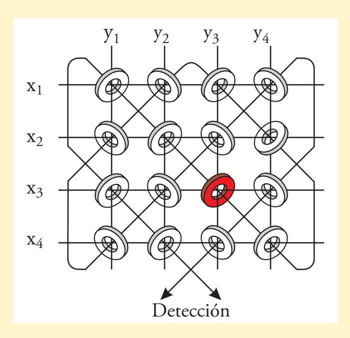
Pero, hay otros materiales magnéticos, con propiedades diferentes y útiles en algunas aplicaciones: los ***magnetoestrictivos***, que se acortan cuando se los magnetiza; los ***magnetorresistivos***, cuya resistencia eléctrica varía con la magnetización; los ***magnetoópticos***, en los que la aplicación de un campo magnético altera su transparencia, o el plano de polarización de la luz que los atraviesa, tal como ocurre, con el campo eléctrico, en las pantallas de cristal líquido; los ***magnetocalóricos***, en los que el efecto de enfriamiento por desmagnetización adiabática es muy notorio y, posiblemente, se utilicen, por eso, en refrigeración. Hay también materiales ***magnetoelásticos***, cuya elasticidad varía con el magnetismo. Estos últimos, sometidos a una fuerza constante, se deforman cuando se les aplica un campo magnético; y si el campo es alterno, vibran. Se hace con eso un *resonador* magnetoelástico, cuya frecuencia de oscilación depende, entre otros parámetros, del esfuerzo al que se encuentre sometido, por lo que se puede usar para medir fuerzas.

## Memorias magnéticas



Memoria de toros de una de las primeras computadoras de la historia, Univac III (Universal Automatic Computer), en 1960. En 1950 usaban memorias de lámparas de vacío, aún más grandes y costosas.

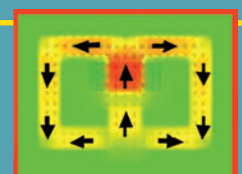
Además de las cintas de datos, audio y vídeo, y los discos magnéticos flexibles y rígidos, cuyo material es de elevada histéresis y, por eso, apto para el almacenamiento de datos, se han usado, de 1950 a 1970, memorias de toros de ferrita, basadas en un ingenioso tejido de cables e imanes y que, aquí mencionamos, no sólo como curiosidad histórica, sino por su valor conceptual.




Si se hacen pasar corrientes de pulsos simultáneos, y del valor apropiado, por los cables $x_3$ e $y_3$ de la figura, se magnetiza el toro rojo, y los demás no, porque se calcula que una sola corriente no alcance a vencer la histéresis. Con cien filas y cien columnas (sólo, 200 cables) se pueden magnetizar 10.000 toros. Para leer el resultado se magnetizan a la inversa, con el mismo método, todos los toros, uno por uno. Cuando le

toque al elegido antes, ese anillo experimentará una variación magnética mayor que los otros, y generará una fuerza electromotriz mayor en el cable de detección que atraviesa todos los aros; entonces, se sabrá que ahí había un bit almacenado. Las memorias actuales, electrostáticas, son más capaces, pequeñas, veloces y baratas, y resultan miles de millones de veces más ventajosas que las de núcleos de ferrita.

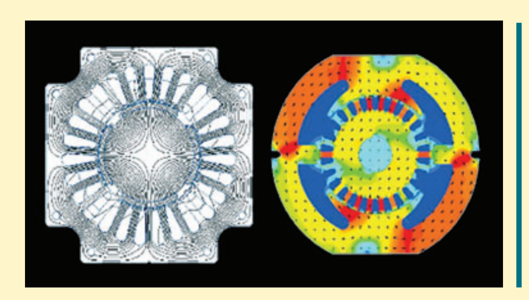
## Software para la simulación y estudio de casos eléctricos y magnéticos



Magnetización del núcleo de un transformador, simulado en el Quick Field. El usuario de ese programa dibuja el núcleo en la pantalla, e ingresa como datos la permeabilidad del hierro y la cantidad de ampere vueltas en la bobina. Las flechas indican el sentido de la inducción.

Internet ofrece una gran variedad de programas para tratar, matemáticamente, diversos problemas eléctricos y magnéticos, sin necesidad de resolver, personalmente, las ecuaciones. Uno, especialmente útil, que ocupa unos 20 MB de espacio en el disco rígido de la máquina, y que se pude bajar en unos minutos de la Red, es el Quick Field 5.4 para estudiantes, gratuito (la versión profesional es más potente.)

El programa se aplica a problemas electrostáticos, térmicos y magnéticos, y muestra, a elección, las líneas de campo, o sus valores en el punto que se señale con el ratón.

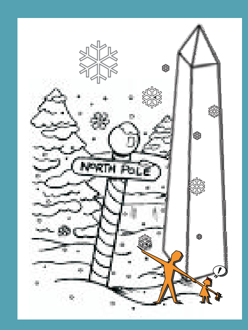


**Líneas de campo en el estudio magnético de motores. Los colores indican diferentes valores de la inducción; en azul el valor más bajo, en el aire, cuya permeabilidad es mucho menor que la del hierro.**

El capítulo 16 amplía datos sobre este potente software, menciona otros programas antiguos y modernos, y da ejemplos de aplicaciones.

## Propuestas de estudio

**9.1.** ¿Hubo algún momento en la historia de la Tierra, en la que Buenos Aires haya *estado en el Polo Norte? Advertencia: esta pregunta carece de significado preciso y se debe interpretar, sólo, como una invitación a discutir el tema magnético y geográfico.*
**9.2.** Para hacer imanes permanentes, ¿conviene un material cuya histéresis sea elevada, o baja? ¿Y qué pieza se calentará mejor en un horno de inducción, una de gran histéresis, o una cuya histéresis sea pequeña?




**9.3.** Averigüen, por favor, qué es una pinza amperométrica, cómo funciona, si su funcionamiento se relaciona con un transformador, y si sirve para corriente continua (son necesarias fuentes de información ajenas a este libro).

**9.4.** Si hubiera manera de tender delgados alambres superconductores entre una gran central eléctrica y nuestra ciudad, y de mantenerlos a la temperatura adecuada, ¿se podría transportar con ellos la misma energía que hoy viaja por gruesos cables de aluminio? Basen su respuesta en las condiciones que limitan el funcionamiento de un superconductor: densidad de corriente e inducción máximas.

**9.5.** ¿Es posible el examen de una muestra de materia inorgánica con un tomógrafo de resonancia magnética nuclear? Fundamenten su respuesta, sea afirmativa o negativa.

**9.6.** Experimenten si una brújula funciona o no en el interior de un coche, o de un subte. Recomendamos que escriban un resumen de los resultados de las pruebas realizadas.

## Otras fuentes de estudio e información




La carrocería de los trenes incluye una gran masa de hierro, y en los subterráneos, además los túneles están reforzados con varillas y vigas de acero.

• Sugerimos buscar en Internet con las palabras paleomagnetismo, resonancia magnética nuclear, cambio climático, y actividad solar.

• Este sitio tiene una explicación clara y accesible de la RMN:
*http://es.geocities.com/qo_10_rmn*

• Informe de estudiantes avanzados sobre los principios de la superconducción; María Emilia De Rossi y Juan Manuel Conde Garrido, Estudio de la interacción entre un superconductor de alta temperatura y un imán permanente, *http://www.df.uba.ar/users/sgil/labo5_uba/inform/info/pract_especial/Superconductor_uba2k2.pdf*

• Vídeo de levitación magnética.
*http://caballodetroyabase.blogspot.com/2007/06/prueba-de-vdeo-youtube.html*

# Electricidad y medio ambiente



Golondrinas en descanso, en uno de sus dos largos viajes de migración anual. Cuando alzan vuelo todas a la vez, sobresaltadas por algún ruido, y se aceleran, hacen sobre el cable una fuerza que triplica su peso, y a veces lo derriban.
Frecuentan las líneas de alta tensión, que las guían en parte de su camino y les sirven de posada, junto con aparatos de maniobra y bancos de capacitores.
Aunque representan un riesgo de daño material, por fortuna nadie piensa en eliminarlas, espantarlas ni incomodarlas, en cambio sí en adaptar las instalaciones, para convivir humanos y pájaros.



Las deposiciones de las aves son muy conductoras de la electricidad. Con la tensión de servicio y la lluvia, chisporrotean como una máquina de soldadura eléctrica, y volatilizan el material de los aisladores. El de la figura, a pesar de los graves daños sufridos, es de una resina que no se carboniza (la epoxicicloalifática), y permaneció en servicio hasta su reemplazo.
Muchas veces el cuidado del medio ambiente y la tecnología parecen opuestos, como cuando los cables tapan el paisaje, o se queman demasiados combustibles fósiles. Son menos conocidos los casos en que uno y otra armonizan.



# Electricidad y medio ambiente

La palabra ecología la creó el biólogo Ernst Haeckel en 1869, con el significado del estudio de la relación entre los seres vivos, entre sí y con su hábitat. El término se publicó treinta años después. Pero desde hace pocos años, el diccionario de nuestra lengua recoge un sentido más usual de ese vocablo, que es la defensa y protección de la naturaleza y del medio ambiente. La preocupación por los efectos ambientales del desarrollo tecnológico es relativamente nueva en la historia. Siempre hubo precursores y pioneros defensores del entorno, pero es a partir de 1980 que la cuestión ambiental nos alarma a todos, quizá porque ya sufrimos consecuencias de descuidos importantes, o porque a partir de las computadoras personales e Internet, hay más información accesible.

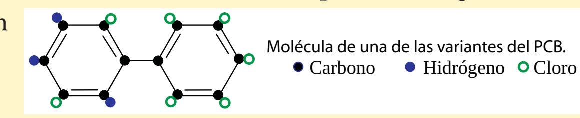
Resumimos varios preocupacionas de raíz ambiental –muchas de ellas fundadas– asociadas con la producción y el uso de la electricidad.

**Recalentamiento planetario.** La mayor parte de la energía eléctrica producida en el mundo proviene de la quema de carbón, gas y petróleo, de la que resulta dióxido de carbono, gas que refuerza el efecto invernadero normal de la atmósfera.

**Agresión del paisaje.** Los cables subterráneos son muy caros, entonces abundan los antiestéticos y peligrosos tendidos de cables a la vista.[1]

**Uso de aceites venenosos.** Algunas variedades de aceites aislantes podrían perjudicar la salud si llegasen a las aguas subterráneas, lo que ocurre cuando los transformadores que los usan tienen fugas. En nuestro país, ese líquido se terminó de retirar de servicio en 2006. La ley 25.670 establece que todo aparato que lo haya contenido debe tener un cartel que lo indique. En el ambiente técnico es frecuente usar expresiones inglesas; en la foto, NO PCB significa, en nuestro idioma, SIN PCB.[2]






Principales yacimientos de carbón. Los Estados Unidos, con el 5% de la población mundial, emiten el 25% del dióxido de carbono que produce el mundo.



Efecto corona, causante de interferencias, en un aislador defectuoso. El fenómeno es casi invisible; la foto se tomó de noche, en pose, y durante un minuto. El campo eléctrico de radiointerferencia tiene un nivel máximo permitido, que se mide en microvolt por metro, con un receptor.

---

1 A veces chocan con los cables helicópteros, avionetas, planeadores y aladeltas.

2 Los PCB son 209 sustancias químicas de la familia del policlorobifenilo, cuya fórmula es $C_{12}\,H_{(10-n)}\,Cl_n$, donde n varía entre 1 y 10. Supuestamente, ese aceite no debería tomar contacto con el exterior; pero los recipientes pierden a veces, como lo delatan las manchas oscuras de polvo adherido, que se ven en algunos transformadores suburbanos. En las ciudades, los transformadores están en cámaras cerradas, algunas subterráneas. (El acrónimo PCB significa, también, *printed circuit board*, plaqueta de circuito impreso; eso dio origen a confusiones en trámites de importación.)

**INTERFERENCIA.** Las líneas en mal estado, sucias, con cables deshilachados o aisladores rotos, ionizan el aire cercano, y generan  ondas que interfieren las comunicaciones.

**RIESGO DE CONTAMINACIÓN RADIACTIVA.** Si bien las centrales nucleares son hoy las más limpias y las menos agresivas del ambiente, la población las ve con gran reserva, sobre todo después de varios accidentes en los que se dispersaron venenos radiactivos.[3]

**ACCIDENTES ELÉCTRICOS.** Estos percances se deben considerar como un problema ambiental de la electricidad, ya que causan la muerte de humanos y animales. Son más los daños por los efectos indirectos de la electricidad (incendio, asfixia, caídas) que por el choque directo. En los inicios de la era eléctrica, en 1900, había mucha sensibilidad popular al respecto; hoy estamos más endurecidos.

**EFECTOS BIOLÓGICOS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS.** A lo dicho en el capítulo 3 sobre el campo eléctrico que admite la Organización Mundial de la Salud, de 5 kV/m, agreguemos que eso corresponde a campos de frecuencia menor de 300 Hz. Hasta la misma frecuencia, el límite de inducción magnética que recomienda ese organismo es de 100 microtesla, unas cinco veces la del campo terrestre. Para frecuencias mayores, el límite es de 5 miliwatt por centímetro cuadrado.[4]

Tanto las instalaciones de transmisión de energía, como los transformadores, transmisores, y todo artefacto eléctrico (eso incluye los teléfonos celulares) emiten radiaciones y campos que son inferiores a los límites higiénicos mencionados. Sin embargo, se oyen voces de alarma al respecto, y hay organizaciones que se oponen a los transformadores a la  vista, a las torres de comunicaciones, y a las líneas aéreas de transporte de energía.[5]



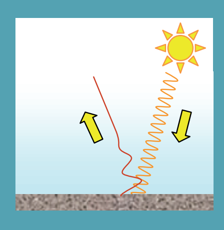
Los cables exteriores dañan doblemente el ambiente; por una parte empeoran el paisaje; por otra, cuando los voltea una tormenta, son fuentes de riesgo de electrocución.

[3] También se denuncian supuestos daños causados por la mera presencia de las centrales nucleares. La cultura hostil hacia esa forma de generación aparece  en sátiras y dibujos animados de países que queman mucho carbón, o donde se teme que los residuos de la industria nuclear se empleen en la fabricación de armas en su contra.

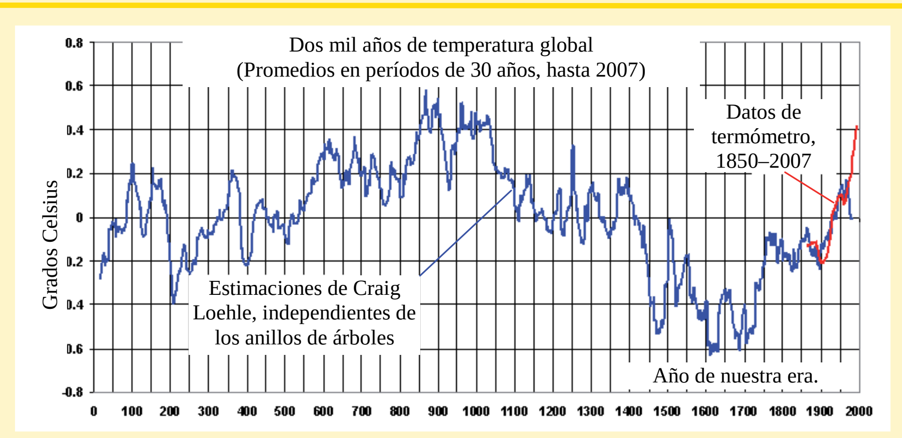
[4] En frecuencias altas hay propagación de ondas, cuyos campos eléctrico y magnético máximos se vinculan por la relación $E/B = c$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío. Por eso se da un único parámetro, en vez uno eléctrico y otro magnético.

[5] Evitamos juzgar las protestas ecologistas; sólo ofrecemos datos y conceptos científicos y técnicos –o los medios para obtenerlos– para que cada uno, y cada una, adopte libremente su posición de conciencia.

## Efectos ambientales de la quema de combustibles fósiles



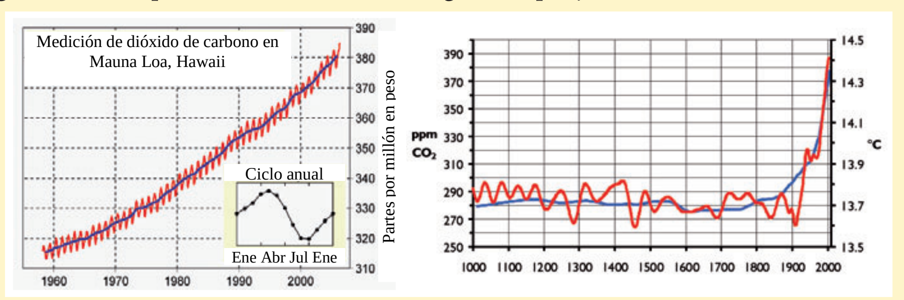
Mecanismo del efecto invernadero. La atmósfera es muy transparente a casi toda la radiación solar, llamada de *onda corta*; la mitad de ella visible. Cuando el Sol incide sobre el suelo, lo calienta, y la Tierra emite una radiación de onda larga, que no atraviesa la atmósfera, la que absorbe esa energía, y aumenta su temperatura.




**La figura revela el llamado período cálido medieval, en el año 1000, y la *pequeña edad de hielo*, seis siglos después. En los últimos dos mil años, la temperatura varió medio grado arriba y abajo del promedio. Pero si sólo se consideran los últimos cinco siglos, se aprecia un aumento grande.**

Hay registros de temperatura desde la invención del termómetro, en el siglo XVIII. Para saber cuál era la temperatura antes, se recurre a testimonios de efectos cualitativos, y más objetivamente, al estudio de los anillos de los árboles[6] y las características químicas de los sedimentos en las cuencas.

Algunos investigadores opinan que el calentamiento global que vivimos ya ha ocurrido antes, muchas veces, y que la generación de electricidad y el uso de automóviles son relativamente inocentes en relación con ese fenómeno. Otros estudiosos –la gran mayoría– consideran que estamos frente a un fenómeno grave y nuevo, coincidente con la era industrial, y causado por la actividad humana, la cual debe cambiar, bajo la autoridad de los gobiernos y el apoyo de empresas y organizaciones, para reducir los efectos negativos que ya sufrimos.



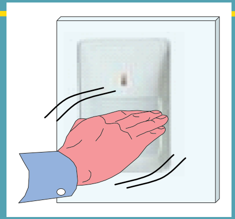

**Nivel de dióxido de carbono en la atmósfera. A partir de la Revolución Industrial del siglo XVIII, se registra un aumento del cuarenta por ciento.**

[6] Craig Loehle no confía en los anillos de los árboles, porque su grosor depende tanto de la temperatura, como de la radiación solar y las lluvias. Las estimaciones de ese investigador se basan en las propiedades químicas de los sedimentos.

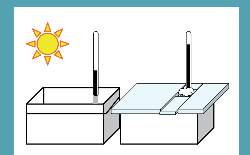
## • Economía de energía eléctrica; prácticas aconsejables

Aparte de las decisiones de gobierno y del trabajo de empresas y organizaciones, los especialistas en cambios atmosféricos hacen las siguientes recomendaciones para las acciones individuales voluntarias, que podrían evitar indeseables medidas económicas disuasivas, como podrían ser los impuestos a los viajes en avión, la prohibición de circulación de coches con una sola persona a bordo, o los aumentos en electricidad y combustibles.

- Cambiar las lámparas incandescentes por fluorescentes compactas, más conocidas como lámparas de bajo consumo.
- Ajustar el termostato del aire acondicionado a una temperatura no muy extrema: 24 grados en verano, y 18 en invierno.
- Moderar el uso del agua caliente, y cerrarla mientras fregamos los platos, o nos desvestimos para el baño.
- Secar la ropa al aire libre, si tenemos lugar, en vez usar el secado eléctrico.
- Comprar productos de papel reciclado, cuya fabricación demanda menos de la mitad de la energía que requiere el papel nuevo. E imprimir sólo lo necesario.
- Consumir, si hay, alimentos frescos. El envasado y el congelado son energéticamente costosos.
- Apagar los aparatos eléctricos que no se estén usando, especialmente estufas, planchas, luces intensas y televisores de tubos de rayos catódicos. En vez de dejar una luz siempre encendida de noche, ponerle un sensor pasivo infrarrojo, que la encienda sólo si alguien se acerca.
- Viajar en transporte público; preferir los coches de menor consumo, y los que pueden cargar alconafta. Compartir el viaje; ofrecerse a acercar a alguien. Manejar sin aceleradas ni frenadas evitables, y evitar los embotellamientos.
- Moderar los vuelos. La mitad del valor del pasaje se quema en las turbinas.
- Plantar árboles. Reponer los que derriban las tormentas. Desalentar la ocupación de plazas y espacios verdes con puestos de comercio, por ejemplo, no comprar nada ahí, o votar autoridades que les brinden espacios adecuados a los artesanos.
- Comprar artefactos que consuman poco, aunque sean más caros. Alentar el desarrollo de productos de bajo consumo. Si somos técnicos o ingenieros, contribuir a esa tarea.
- Se discute si la basura se debe quemar o enterrar, porque en ambos casos produce gases invernadero; dióxido de carbono en el primero, y metano en el segundo. Todo lo que podemos hacer es tratar de producir menos residuos.



• Experimentación del efecto invernadero. El detector de intrusos es sensible a la onda larga, pero no a la corta. La luz de una linterna no lo excita, y deja de funcionar si se lo tapa con un vidrio. Eso demuestra que el vidrio es opaco a la onda larga, aunque sea transparente a la corta. El film de cocina es transparente a las dos ondas. Si se tapa una caja con un vidrio, se calienta más al sol, que si se la tapa con la lámina de polivinilideno.





• Los aparatos destinados a evaporar agua (tostadoras, secadores) son de elevada potencia; pero si se los usa poco tiempo, entonces no gastan mucho.




Medidor programable y portátil de potencia eléctrica y de gasto acumulado de energía. Recibe los datos por radio, y permite saber cómodamente cuánto se consume en cada período que interese, qué potencia se desarrolla en cada instante, o cuánto gasta, (en dinero por bimestre) un artefacto dado, que se enciende durante unos segundos de prueba. Transmite en 433 MHz; tiene un alcance de 40 a 70 m, según la edificación; una memoria de 64 kB, se puede conectar a una computadora, y funciona con dos pilas. Lo fabrica Efergy, del Reino Unido.

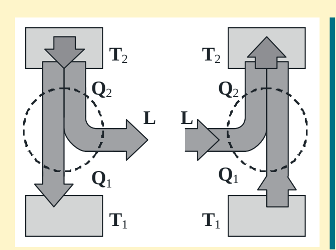
| VEHÍCULO | PASAJEROS | CONSUMO, LITROS /100 km | |
|---|---|---|---|
| | | TOTAL | POR PASAJERO |
| Barco | 3.000 | 35.000 | 12 |
| Tren | 300 | 600 | 2 |
| Avión | 200 | 700 | 3,5 |
| Ómnibus | 50 | 60 | 1,2 |
| Camioneta | 5 | 14 | 2,8 |
| Coche grande | 4 | 10 | 2,5 |
| Coche pequeño | 4 | 6 | 1,5 |
| Motocicleta | 1 | 5 | 5 |
| Bicicleta[7] | 1 | 3,3 | 0,3 |
| A pie[7] | 1 | 1,5 | 1,5 |

De la tabla resulta que el viaje de una persona sola[8] en un coche grande, es energéticamente más costoso que el de un vuelo compartido con doscientos pasajeros.

Una gran parte del desperdicio de energía obedece no tanto al despilfarro desaprensivo, ni a la falta de solidaridad, sino simplemente al desconocimiento de hechos energéticos básicos, entre ellos el de poder diferenciar, en la factura del servicio eléctrico, los impuestos y costos fijos, de lo que cambia con el consumo; o la sensación, a veces falsa, de que los artefactos grandes, o caros, consumen más que los pequeños.

Un hecho poco conocido es que los aparatos enfriadores de aire, que realmente consumen mucho cuando se les da ese uso, son en cambio muy económicos y eficientes cuando se los usa como calefactores. Hay modelos reversibles, que cumplen las dos funciones. Un simple mecanismo de válvulas de paleta, dirige el aire de dos maneras diferentes: en una, toma el calor del interior de la habitación y lo expulsa al exterior: y en la otra, toma calor de afuera, y lo vuelca adentro.

Veamos el fundamento termodinámico de esa idea.




**Esquemas termodinámicos de una máquina térmica y de una máquina frigorífica.**

La figura de la izquierda representa, por ejemplo, un motor de automóvil, o una máquina de vapor, que toma un calor $Q_2$ de una fuente que está a una temperatura $T_2$, entrega por su radiador una cantidad menor de calor, $Q_1$, a una fuente más fría, de temperatura $T_1$; y brinda la diferencia de calores en la forma de un trabajo útil, $L$.



La calefacción con un acondicionador de aire reversible es cinco veces más económica que la de una estufa eléctrica. Esa máquina absorbe calor del exterior.

[7] Se calculó el equivalente en combustible del calor desarrollado en esos ejercicios; dado que, para ser justos, la respiración animal, y otros gases que emitimos, son también fuentes de dióxido de carbono y metano, dos gases invernadero.

[8] Esa acostumbrada practica, y la generación de energía eléctrica a partir de la quema de combustibles, son las mayores –y casi las únicas– fuentes de gases invernadero, casi seguramente causantes del actual cambio climático.

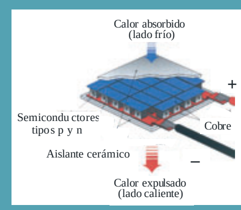
A la derecha de la misma figura, un refrigerador. Se le entrega, con un motor, un trabajo $L$. La máquina absorbe del ambiente que enfría una cantidad de calor $Q_1$, que sumada al trabajo, expulsa al exterior en forma de calor $Q_2$.

Para este último caso, la relación entre esas magnitudes, en un caso ideal, es la de la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_2}{L} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$$

Por ejemplo, para una temperatura en la calle de $T_1$ = 5 °C, y una en la casa de $T_2$ = 18 °C, que en grados Kelvin (o de temperatura absoluta) equivalen, respectivamente, a 278 K y 291 K, la relación entre el calor ingresado a la vivienda y el trabajo eléctrico gastado, es de 278/23, un factor 12 de economía.

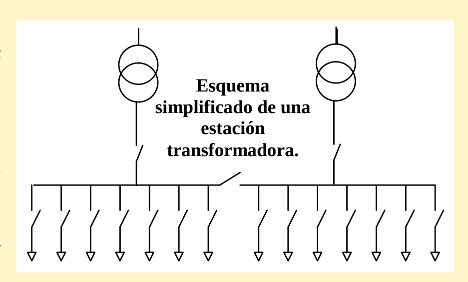
En la práctica, una máquina real permite una mejora en un factor cinco. Un acondicionador en reversa calienta, al menos, como cinco estufas de la misma potencia eléctrica.




Celda Peltier, basada en el efecto del mismo nombre, por el cual una corriente que atraviesa la unión de dos conductores de diferente tipo, la calienta, o la enfría, según la polaridad. Se usan desde 1950 como refrigeradores reversibles, sin gases ni piezas móviles.

## Riesgos y necesidades de la electrodependencia

El ansia de la indispensable libertad hace que deploremos todo tipo de dependencia, entre ellas la tecnológica.[9] Pero tampoco deseamos una vida salvaje e incómoda, con hambre, enfermedades y muertes en el parto. Tratamos entonces de reducir los riesgos de falta de energía, por ejemplo con dobles líneas de alta tensión, conexiones de doble alimentación, y en anillo, para la distribución de energía, y con dos grupos electrógenos de emergencia para cada hospital o lugar crítico de salud y de vida. La figura muestra un esquema típico de distribución Llegan dos líneas de alta tensión, que alimentan un par de transformadores. Dos conjuntos de interruptores distribuyen la energía entre las ciudades. Cuando falla una línea, o un transformador, se los desconecta, y se alimenta todo desde la otra rama, hasta que arreglen el desperfecto. Hay sistemas de doble juego de barras horizontales, por si la falla ocurriera en el propio tablero de distribución, el cual se construye de modo que un percance en una parte, no propague el daño a otras.






Cortocircuito de 690 V, 65.000 A y 0,1s, de energía equivalente a la de dos kilogramos de explosivo, en una prueba de arco interno de una celda de interruptor. No tienen que volar chapas, abrirse puertas, ni quemarse ninguna de las gasas colgadas del bastidor, que representan posibles circunstantes. La aprobación de ese ensayo es un indicio de aptitud para el servicio.

[9] Al matemático Manuel Sadoski (1915–2005) le preguntaban siempre si las calculadoras podrían entorpecer el desarrollo de la habilidad mental, y generar una verdadera dependencia. El investigador, creador de la computación en la Argentina, después de dar ejemplos de pensamiento creativo con calculadoras, decía: *–¿Acaso no dependemos también de las vacunas, del agua potabilizada, del teléfono, y de la energía eléctrica? ¡Está bien depender de cosas buenas y útiles!*



- El caduceo es el símbolo de Hefestos, Hermes Trismegisto (el Tres Veces Grande), o Mercurio, dios del comercio. Ese ícono, en los envases de pilas, indica la presencia de mercurio.



- El Sombrerero Loco (Dibujo de John Tenniel), personaje de Alicia en el País de las Maravillas, de Lewis Carroll, alude a un caso frecuente en la Inglaterra del siglo XIX. Muchos fabricantes de sombreros enfermaban de los nervios al manipular fieltro tratado con sales de mercurio, que se usaban como mordientes para que fijasen las tintas. Hoy preocupa el mercurio de las pilas.

## • Salubridad

Aparte de lo dicho en relación con la emisión de gases invernadero, los aceites contaminantes y los mínimos campos electromagnéticos, mencionamos otras cuestiones vinculadas con la salubridad, la energía eléctrica, su producción y sus usos.

**Aditivos de retardo de llama.** En la prevención de los daños por incendio, hay una oposición entre la reducción del riesgo de quemadura y la reducción del riesgo de intoxicación. En la tragedia de República de Rock–Magnon en el barrio de Once en Buenos Aires, a fines de 2004, nadie resultó gravemente quemado; pero sí murieron casi doscientas personas por intoxicación con los gases venenosos que despidieron los plásticos a los que se les añaden sales de bromo y otras sustancias que reducen la velocidad de propagación de la llama en caso de incendio; los mismos que se usan en la envoltura aislante de los conductores eléctricos. En ciudades de países industrializados, pero con muchas construcciones de madera y materiales combustibles, se prefiere el humo venenoso al fuego vivo. Quizás en las ciudades argentinas, en las que se emplea más el ladrillo, convenga, a la inversa, reducir las exigencias de incombustibilidad de los materiales eléctricos aislantes.

**Ruido.** Los reactores, reactancias o balastos de los tubos fluorescentes grandes, o de las lámparas de mercurio, tienen una bobina con núcleo de hierro laminado que sirve para regular la corriente.[10] Cuando las chapas del núcleo se aflojan, vibran y generan un ruido molesto e insalubre. Los artefactos de arranque electrónico suelen tener núcleos de ferrita, en los que el material magnético no está dividido en láminas separadas, sino en forma de polvo disperso en cerámica maciza y aislante; entonces no hacen ruido, aunque se aflojen sus partes.[11]

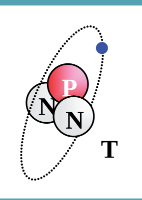
**Mercurio en las pilas de botón.** La energía que suministra una pila es insignificante frente a la que se obtiene de la red por el mismo costo. Una pila botón de 2 volt y 200 mA.h puede, en teoría, suministrar doscientos miliampere durante una hora. Eso equivale a 1 × 0,2 A × 2 V = 0,4 W.h, ó 0,0004 kW.h. El precio de esa energía, si se la toma de la red, es de 600 microcentavos, o seis micropesos. La pila vale un peso, quince mil veces más de lo que brinda. Sin embargo, las usamos igualmente, porque no podemos llevar un reloj pulsera o una calculadora siempre enchufados en un tomacorriente. El alto costo de la energía de las pilas se justifica

[10] Si no estuviera el balasto, la corriente crecería hasta la destrucción de la lámpara, o hasta que actúe alguna protección, porque los gases son CTN (de coeficiente de temperatura negativo, en inglés NTC), materiales cuya resistencia disminuye al aumentar la temperatura. A la inversa, los metales sólidos aumentan su resistencia eléctrica cuando se calientan (*balasto* significa carga, o contrapeso).

[11] Los núcleos magnéticos de transformadores, balastos y motores suelen estar laminados, o ser de ferritas, porque si fueran enterizos de hierro, la inducción alterna generaría en el metal fuerzas electromotrices que harían circular corrientes en remolino (*eddy currents*), con recalentamiento del material y pérdidas de energía.

por el servicio especial que brindan. El problema con ellas es que, cuando se las desecha, afectan la salubridad del medio ambiente, porque contienen mercurio, un elemento químico pesado, cuyas sales son muy tóxicas y producen enfermedades nerviosas y renales. En nuestro país hubo un caso de intoxicación grave con pañales de tela desinfectados con sales de mercurio. Medicamentos a base de mertiolato o mercurocromo o timerosal ($C_9H_9HgNaO_2S$) cambiaron de fórmula y ya no usan mercurio. en nuestro país algunos municipios ya se ocupan de recoger las pilas gastadas, para asegurarles un destino alejado del agua que bebemos.

En la actualidad y en nuestro país, la mayor emisión de mercurio al ambiente proviene de la incineración de residuos hospitalarios.




La reacción de fusión para obtener energía útil también es factible con tritio, un isótopo del hidrógeno con dos neutrones, además del protón.

## Mercurio en las lámparas fluorescentes

Por una parte, el uso de lámparas fluorescentes compactas ahorra energía; eso hace que se quemen menos combustibles, se emitan menos gases invernadero, y se contribuya a disminuir la gravedad del cambio climático. Pero por otro lado, esas lámparas contienen mercurio, perjudicial para el medio ambiente, cuando llega al agua subterránea después de tirar a la basura esas lámparas, cuando ya no sirven.

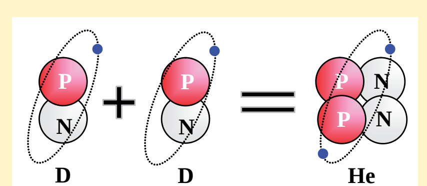
En nuestro país, sólo unos pocos municipios tienen en marcha un sistema de recolección diferenciada de esa clase de residuos. Hay quienes, por eso, se oponen a las campañas de reducción de consumo basadas en el reemplazo de lámparas incandescentes por fluorescentes.



En un kilogramo de gas a la temperatura ambiente hay miles de trillones de átomos de variadas velocidades, distribuidas alrededor de un promedio. Pero la probabilidad de que un solo núcleo tenga velocidad suficiente como para incrustarse en otro, es insignificante. Aun así se especuló con la *fusión fría*, realizada en un líquido por el que circula corriente. Martin Fleischmann y Stanley Pons la anunciaron a la prensa en 1989, después de que una revista especializada les rechazó un artículo. El supuesto resultado no se pudo repetir, y hoy casi toda la comunidad científica lo considera un error de medición.

## Energía limpia de fusión

Todavía está en fase experimental, con resultados prometedores, la obtención de energía eléctrica en centrales nucleares de fusión.[12] En esas instalaciones se unen entre sí núcleos de deuterio, para formar núcleos de helio. El deuterio es una variedad del hidrógeno, que en vez tener un protón y un electrón, como el hidrógeno ordinario, tiene además un neutrón. Ese




[12] La palabra *fusión* tiene dos significados; uno es el de pasar un cuerpo del estado sólido al líquido. Otro es el de unión, por ejemplo la de dos empresas, o la de dos núcleos atómicos.

isótopo[13] del hidrógeno, está presente en el agua común, en una proporción del 0,014%. De cada siete mil átomos de hidrógeno, uno es de deuterio.

La masa de un átomo de helio es un poco menor que la masa de dos átomos de deuterio. En unidades *u* de masa atómica:[14]

| | | | |
|---|---|---|---|
| Átomo de deuterio: | 2, 014102 u; | el doble: | 4,028204 u |
| Átomo de helio: | | | 4,002603 u |
| Diferencia: | | | 0,025501 u *(más del 0,5%)* |

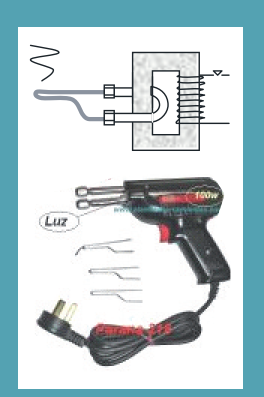
De cada 18 kilogramos de agua, dos son de hidrógeno, en cada uno de los cuales hay 0,00014 kg de deuterio. El medio por ciento de eso es 0,0000014 kg de materia, que convertida en energía con la célebre fórmula de Einstein $E = mc^2$, resulta de más de $10^{11}$ joule, o watt segundo, que equivalen a 35.000 kilowatt hora, suficientes para alimentar una casa mediana durante setenta bimestres, u once años. Y sólo con un balde de agua de la canilla.

Los residuos de esa reacción nuclear son inocuos, y se pueden ventilar a la atmósfera sin prevenciones. Pero para acercar suficientemente dos núcleos de deuterio, en contra de la formidable fuerza de repulsión eléctrica, que podríamos sentir en los dedos,[15] hay que arrojar los núcleos unos contra otros con suficiente velocidad, y para eso hay que calentar un gas a cien millones de grados.

## Un posible generador de plasma

Recordemos (capítulo 2) que un plasma es un gas totalmente ionizado, lo que ocurre (entre otros casos), cuando se encuentra a una elevada temperatura. En esas condiciones, conduce bien la electricidad,[16] porque está compuesto de iones libres de ambas polaridades, que reciben fuerzas de los campos eléctricos presentes.

En el reactor de cámara toroidal el plasma se encuentra en la circunferencia central del toro, donde está la flecha azul de la figura. Hay una bobina primaria, marcada en rojo, arrollada alrededor de un núcleo paramagnético. El anillo de plasma conductor funciona como un secundario de una sola espira en cortocir-




Como el reactor, el transformador del soldador instantáneo tiene un secundario de una sola espira en cortocircuito.

[13] *Isótopo*, en griego, significa *en el mismo lugar*. Los elementos químicos cuyos núcleos tienen igual cantidad de protones, y sólo difieren en la de neutrones, se consideran el mismo elemento químico, y ocupan la misma casilla en la tabla periódica de los elementos.

[14] Una unidad de masa atómica es la duodécima parte de la masa de un átomo de carbono 12, y vale 1 u = 1,660 737 86 × $10^{-27}$ kg.

[15] Los protones tienen carga muy pequeña; pero cuando se fusionan están muy cerca uno del otro.

[16] Por eso a veces no se sabe si un incendio fue causado por un cortocircuito, o si el cortocircuito ocurrió cuando el fuego ofreció un camino conductor de la electricidad, en una instalación en buen estado.

cuito, que se calienta para el arranque cuando se alimenta la bobina primaria con tensión alterna de alta frecuencia.

En anillo azul representa una de muchas bobinas alrededor del toro, que en conjunto generan una inducción en la dirección del hilo de plasma. Y así como las partículas cargadas que vienen del Sol siguen las líneas del campo magnético terrestre, la inducción de las bobinas alrededor del toro ayudan a mantener el hilo de plasma bien delgado, y alejado de las paredes, para que el plasma no se enfríe, y las paredes no se quemen. (La flecha roja indica el sentido de circulación de la corriente en los anillos azules.)

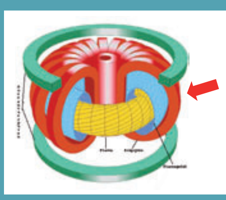
Los cables paralelos por los que circula corriente, se atraen. Por la misma razón, el hilo de plasma tiende a mantenerse unido por ese efecto de encogimiento radial.

Cuando el plasma alcanza unos cien millones de grados, comienzan las reacciones de fusión, y genera energía propia que ya no viene de afuera.

Esa condición ya se alcanzó experimentalmente durante tiempos muy breves, desde hace décadas.

El calor generado en la reacción puede calentar un fluido de intercambio, para hervir agua y generar vapor que aprovechen turbinas, pero se investiga también la posibilidad de extraer directamente la energía eléctrica del propio reactor, por medios electromagnéticos y sin turbinas, si se consigue la adecuada oscilación de una corriente en el plasma.

Hay decenas de países, cada uno con varios reactores de fusión en marcha, que procuran avanzar en el desarrollo de prototipos que funcionen de manera estable, y no por breves períodos experimentales. Se calcula que en 2020 estaría resuelta esa etapa, e iniciada la de obtención de un reactor de utilidad industrial.



Para poder hacer circular la grandes corrientes necesarias para generar campos magnéticos intensos, se usan supercodutores enfriados con nitrógeno líquido.

## Otras aplicaciones del plasma

Si tenemos en cuenta que cualquier gas incandescente es un plasma, hay varias aplicaciones de la materia en ese estado de agregación.

**Corte de plasma.** Los equipos de corte de plasma tienen una boquilla o soplete por el que sale gas a presión, que se calienta hasta 30.000 grados con un generador eléctrico de alta frecuencia conectado a un electrodo resistente a la oxidación y a las altas temperaturas. Consiguen concentrar la energía en una zona muy pequeña, y algo alejada del electrodo, por lo que éste no se funde. El método sirve para hacer cortes muy delgados y precisos. En la foto, un equipo portátil, de 220 V y 3,3 kW, que corta metales de hasta un centímetro de grosor.

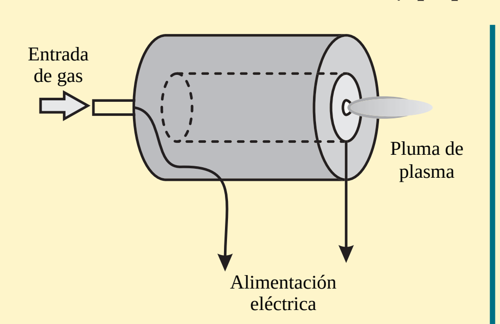




El plasma es el estado más común de la materia en el universo, tanto en las estrellas, como en otras regiones amplias del espacio, y en la parte más alta de las atmósferas de los planetas.

**Pantallas de plasma.** El capítulo 2 muestra un esquema del funcionamiento para el caso de pantallas de televisores y monitores. La técnica se aplica a otros tipos de pantallas, además de las gráficas; por ejemplo en indicadores para equipos de sonido, y en tableros de mando de máquinas. Cada signo luminoso se compone de dos electrodos; uno de ellos común a todos los signos, o a un grupo de ellos, que suele ser una reja muy fina y casi transparente. La presión del gas varía, según los modelos, ente 100 y 500 torr.[17] La tensión de funcionamiento es de algunos centenares de voltios, suficientes para ionizar el gas cuando se aplica a dos electrodos muy cercanos entre sí. Los iones, y los fotones ultravioleta que resultan del proceso, chocan contra un material fluorescente, y excitan sus átomos. Cuando los átomos vuelven, casi al instante, a su estado de reposo, emiten energía en forma de luz, de un color típico para cada material fluorescente.

**Plasma frío.** Se emplea con fines de desinfección de tejidos vivos, esterilización, tratamiento de superficies para limpieza profunda, y erosión microscópica para aumentar la adherencia de pinturas. Para conseguir un alto grado de ionización se emplean pulsos muy breves de alta tensión, para que los efectos térmicos acumulados de las corrientes sean muy pequeños.




**Generador de plasma frío desarrollado por Mounir Laroussi y XinPei Lu, de la Old Dominion University, en Virginia, Estados Unidos. Unos pulsos de varios miles de volt y un microsegundo de duración, ionizan gas de helio, que ingresa a presión.**



El plasma de una lámpara de mercurio alcanza una temperatura, llamada *temperatura de color*, de unos 6.000°C. Sin embargo, la del tubo de cuarzo que lo contiene, no llega a 300°C. No hay contradicción en ese hecho, porque el gas no está en equilibrio térmico con el recipiente, dado que emite radiación.
Lo mismo ocurre con la *termosfera* de nuestro planeta. Esa capa de la atmósfera, ubicada a unos 300 km de altura, es un plasma de 1.500°C, que no nos quema porque no está en equilibrio térmico con la Tierra.

## Propuestas de estudio

**10.1.** Les proponemos rehacer los gráficos de este capítulo, para que incluyan el cero, y estimen si causan la misma impresión subjetiva que como se los presenta habitualmente, con el cero fuera de la escala.

**10.2.** Un acondicionador de aire de frío y calor, de 1.260 W y 3.000 frigorías por hora vale $ 2.000; y su instalación, $ 600. Una estufa de aceite de 1.500 W cuesta $ 200, y se la mantiene encendida mil horas anuales. Una frigoría, lo mismo que

[17] Un torr es la presión de una columna de un milímetro de mercurio.

una caloría, equivale a 4.185 J, o W.s. La energía eléctrica cuesta $ 0,15 el kWh. Con los datos de este capítulo acerca de la eficiencia calefactora de un acondicionador, teniendo en cuenta sólo el factor económico personal, y sin contar la ventaja de disponer de frío en verano, ¿a partir de cuánto tiempo el cambio de la estufa por el acondicionador empezaría a resultar ventajoso? (a) seis meses, (b) un año; (c) tres años; (d) diez años; (e) más de diez años.

**10.3.** ¿En qué se gasta más energía eléctrica, en mantener una luz encendida de noche en el vestíbulo, o en tostar el pan del desayuno? (por favor, estimen los datos necesarios).

**10.4.** La energía cinética de una partícula se calcula como $E_c = ½\, m\, v^2$, donde $m$ y $v$ son su masa y su velocidad. Por otra parte la energía cinética se relaciona con la temperatura mediante $E_c = K.T$, donde $K$ es la constante de Boltzmann, $1{,}38065 \times 10^{-23}$J/K, y T la temperatura Kelvin o absoluta. La masa de un núcleo de deuterio es de $1{,}66 \times 10^{-27}$ kg ¿Cuánto vale, aproximadamente, la velocidad de los núcleos de deuterio en un gas a cien millones de grados?

**10.5.** En un movimiento circular, la aceleración vale $v^2/R$, donde $v$ es la velocidad, y $R$ el radio. Si el reactor de fusión tiene un radio de diez metros, ¿cuánto vale la aceleración de un núcleo de deuterio?

**10.6.** La fuerza de Lorenz vale $F = q.v.B$, donde $q$ es la carga, $v$ la velocidad, y $B$ la inducción magnética. La fuerza, la masa y la aceleración se vinculan con la segunda ley de Newton, $F = m.a.$ ¿Cuánto vale la inducción magnética necesaria para mantener en movimiento circular de diez metros de radio un núcleo de deuterio de un gas de cien millones de grados?

**10.7.** Una persona llegó a su trabajo a las tres de la tarde, vio una sala con todos los tubos fluorescentes encendidos, y apagó esas luces, que juzgó innecesarias en ese momento del día. Enseguida le pidieron que las volviese a encender, porque al caer la tarde la compañía eléctrica reduce la tensión de la red para disminuir el consumo, o la tensión baja sin que la compañía se lo proponga, cuando se cargan las líneas con mucho consumo; y entonces los tubos no arrancarían. Comenten el caso.



- Una consecuencia ecológica de los embalses, es el corte de la ruta de desove de los peces. El ascensor de la figura genera una corriente con bombas; los peces nadan en contra, los captura, los sube, y los libera del otro lado del dique, aguas arriba.



- Nido de aves en una línea de media tensión. Se discute si hay que dejarlo en beneficio de los pájaros. En nuestro país se los quita, porque las interrupciones del servicio eléctrico son costosas no sólo en bienes materiales, sino también en salud y vidas humanas. El llamado pájaro espinero, para hacer su nido, incluye alambres que encuentra, con los que a veces produce cortocircuitos.

## Otras fuentes de estudio e información

• Sugerimos buscar en Internet con las palabras: medio ambiente, electricidad, cambio climático, calentamiento global, PCB, fusión nuclear, tokamak y stellamak (son diferentes modelos de reactores).

• Explicación de los avances en la construcción de reactores de fusión nuclear. (Manifiesta tendencias en favor de la fusión fría, descalificada por la comunidad científica mundial.): *http://www.arrakis.es/~lallave/nuclear/fusion.htm*

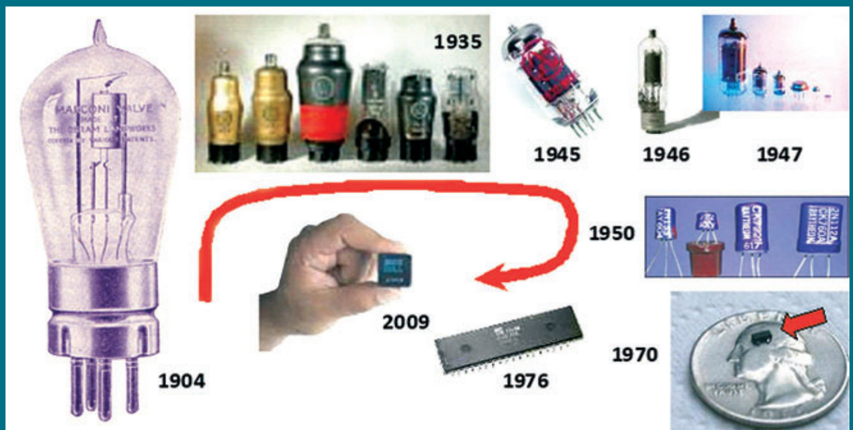
• Informe de funcionarios y especialistas argentinos de primer nivel, en materia de salubridad ambiental electromagnética:
*http://www.cnc.gov.ar/normativa/pdf/sc0202_95AI.pdf*

# Capítulo 11

# Historia de la electrónica




● Edwin Howard Armstrong y Marion MacInnis, en su luna de miel en Palm Beach, Florida, Estados Unidos, posan para una propaganda comercial.
El inventor de la radio FM, muy orgulloso del *pequeño* tamaño del aparato, regala a su esposa el primer receptor portátil de la historia.




● La primera válvula o *lámpara* de radio, con la que se amplificaban las ondas y el sonido, se inventó en 1904. Siguieron otras más eficientes y pequeñas; y, después, los transistores, de igual función, pero de menor tamaño y consumo. En 1976 se fabricó el circuito integrado Z 80, con 8.000 transistores que, aún, sirve de computadora. Hoy hay reproductores de sonido y radio que contienen el equivalente de veinte mil millones de transistores y almacenan igual cantidad de bits de información, suficientes para cien horas de grabación de sonido.
Los datos históricos ayudan a predecir algunos hechos futuros, a valorar el trabajo de los precursores y a equilibrar las ansias de bienes tecnológicos novedosos que quizás en poco tiempo resulten anticuados.

# Historia de la electrónica

El término *electrónica* se empezó a usar en 1910 cuando se consiguió explicar el fenómeno que desde 1895 se conocía como *efecto Edison*, o *efecto azul*.

Desde mediados del siglo XIX, cuando la energía eléctrica se empezó a distribuir y vender y, hasta los comienzos del siglo XX, su empleo en iluminación se limitaba a los arcos voltaicos,[1] los que no se podían usar en puestos de venta de combustible, salas de pintura, ni ambientes con gases inflamables, porque un arco es una chispa permanente. Un alambre se calienta cuando conduce una corriente eléctrica, y se puede poner incandescente y emitir luz. Ése era un hecho muy conocido, que se intentó usar para el alumbrado. Para que el alambre no se quemase, lo encerraban en una ampolla al vacío. No se quemaba, pero se volatilizaba, o se fundía. Fue Edison quien consiguió por primera vez, en 1879, mantener encendida durante dos días una lámpara de filamento. Para eso, en vez de metal usó carbón, cuyo punto de fusión es de 3.500 °C.[2]

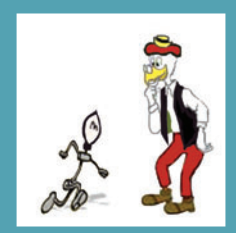


Thomas Alva Edison (1847–1931), uno de los fundadores de la General Electric, perfeccionaba ideas propias y ajenas. Inventó el fonógrafo y la máquina de votar, y mejoró el telégrafo y las pilas eléctricas.

Las fibras de bambú y palma carbonizadas le sirvieron para hacer hilos muy resistentes y duraderos. Después de varias pruebas con filamentos de diferente grosor y longitud, Edison fabricó la primera lámpara comercial, tan difundida enseguida en todo el mundo, que su encendido se constituyó, durante mucho, en el principal destino de la energía eléctrica.



**Lámpara de filamento de carbón inventada por Edison. El zócalo de bayoneta resiste sin aflojarse las vibraciones en los vagones de tren.**



Walt Disney (1901–1966) quizá se inspiró en Edison para crear sus personajes Giro Sin Tornillo, el inventor, y su ayudante de filamento en bucle y pico de vacío arriba de la ampolla, igual que la primera lámpara eléctrica.

## Ennegrecimiento interno del vidrio

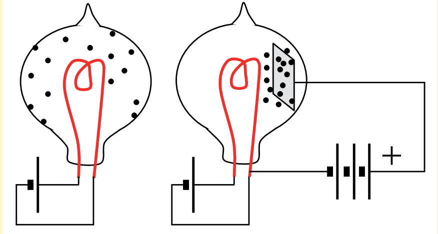
En esa primitiva lámpara, a las pocas semanas de uso, el carbón volatilizado del filamento manchaba el vidrio, como se ve en la foto, y disminuía la intensidad de la iluminación. Al fabricarlas, se les ponía un poco de arena adentro, para lim-

[1] Descrito en el capítulo 5.

[2] Después se usó, hasta hoy, el tungsteno, o wolframio, un metal cuya temperatura de fusión es de 3.483 °C, casi igual que la del carbón.

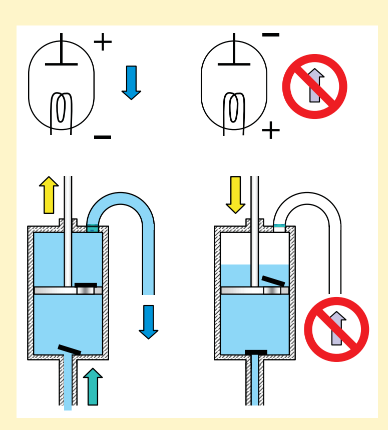
piarlas cada tanto con movimientos; pero esa operación era incómoda, y aumentaba el riesgo de rotura del filamento, o de la ampolla.

Edison imaginó que las partículas de carbón desprendidas del filamento se podrían capturar electrostáticamente (como el humo de una chimenea) antes de que chocasen contra el vidrio. Para eso agregó a la lámpara una placa, y experimentó con unos 100 V de ambas polaridades, positiva y negativa, con respecto al filamento.




Capturó las partículas. Pero en ese momento ocurrió algo sorprendente, que cambió por completo el curso de su investigación.

Lo llamativo fue que cuando la placa era positiva con respecto al filamento, circulaba corriente entre esos dos electrodos; y además se veía un fulgor azul cerca de los conductores. Pero cuando la polaridad se invertía, no circulaba corriente, ni se veía fulgor.




La lámpara con la placa se comporta, entonces, como una *válvula* de una cámara de pelota o de neumático, o de una bomba de agua, que deja pasar el fluido en un sentido, pero le impide el paso en el sentido opuesto.

Se supuso que las partículas de carbón quedaban convertidas en iones, o sea cargadas eléctricamente, y que la corriente eléctrica observada estaba era el flujo de esas partículas. Por eso, la lámpara con placa se llamó *válvula termoiónica*.

**La válvula de Edison permite el flujo en un solo sentido, como en una bomba de agua. (Las flechas indican el sentido convencional de la corriente, desde el positivo hacia el negativo).**

No se sabía el porqué las partículas cargadas de carbón viajaban, supuestamente, en uno solo de los dos posibles sentidos.

Después, con mediciones cuidadosas y la aplicación de campos magnéticos, se supo que la corriente debida a las partículas de carbón es muy pequeña, y que casi toda la conducción se debe al flujo de electrones, que salen del filamento caliente y los atrae la placa; la cual, como está fría, no los emite. Se propuso entonces (contra la costumbre y sin éxito) el nombre de *válvula termoelectrónica* para ese aparato. Esta válvula en particular, la primera histórica, y la más sencilla, formada por un





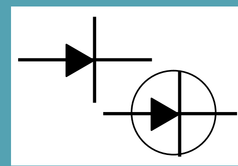


Otras antiguas formas de conseguir que la corriente circule en un solo sentido: el diodo de *piedra galena*, que se toca con un alambre delgado, el *bigote de gato*; el *diodo de llama*; y el *diodo de óxido de germanio*. Los dos primeros no manejan tanta corriente como una válvula termoiónica o termoelectrónica; y el de selenio ofrece mucha resistencia.

filamento y una placa, se llamó también *diodo*, por estar compuesta de dos electrodos, ánodo y cátodo. El filamento es el cátodo, o polo negativo; y la placa, el ánodo, o polo positivo.[3]

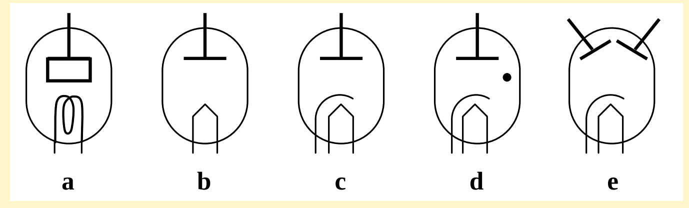
La válvula eléctrica, como elemento de un circuito que deja pasar la corriente en un sentido, y lo impide en el opuesto, tenía una utilidad mayúscula a principios del siglo XX, porque se la empezó a usar para detectar ondas electromagnéticas generadas con chispas, con la posibilidad de usarlas en comunicaciones sin necesidad de cables. Nada de eso existía todavía; aunque el escritor de fantasía científica Julio Verne (1828–1905), ya les había dado nombre: *radiotelegrafía* y *radiotelefonía*, o telegrafía y telefonía inalámbricas.

En la polémica sobre si convenía distribuir la energía eléctrica en forma de corriente alterna o continua, Edison era partidario de la continua. Cuando se impuso el criterio opuesto, desarrolló válvulas verdaderamente termoiónicas, en las que las partículas que transportan la corriente no son electrones, sino átomos ionizados. La más popular fue la válvula de gas de mercurio.

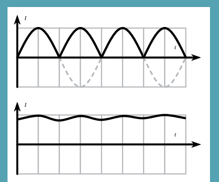


Símbolo de un diodo, o elemento que conduce en un solo sentido, cualquiera sea su tipo, incluidas las válvulas de vacío y de gas. El ícono proviene del *bigote de gato* que toca un cristal de galena. Cuando se lo encierra en un círculo, significa que está encapsulado.
El sentido convencional de circulación de la corriente es de positivo a negativo; el opuesto al del movimiento de los electrones.

## Diodos termoelectrónicos y termoiónicos




**La válvula diodo y sus símbolos. (a) Representación primitiva. (b) Se simplifica el dibujo del filamento y el de la placa. (c) Válvula de calentamiento indirecto: el filamento se aloja dentro de un cilindro, que funciona como cátodo, y está hecho de un material apropiado para la emisión de electrones. (d) El punto indica la presencia de gas; por ejemplo, de mercurio. (e) Válvula de doble placa, útil para la conversión de corriente alterna en continua.**

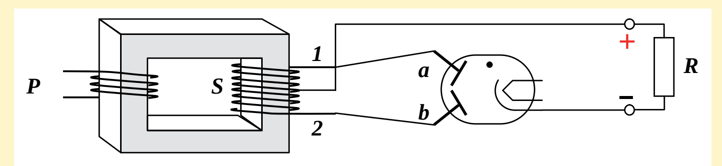


A pesar de que la representación de la tensión de salida no es una recta, a los elementos que dejan pasar corriente en sólo un sentido se los llama *rectificadores*. El nombre proviene de circuitos más avanzados, en los que la salida pulsante se convierte realmente en algo parecido a una recta, con la ayuda de *filtros*, que almacenan carga durante parte del período, y la entregan en otros instantes.

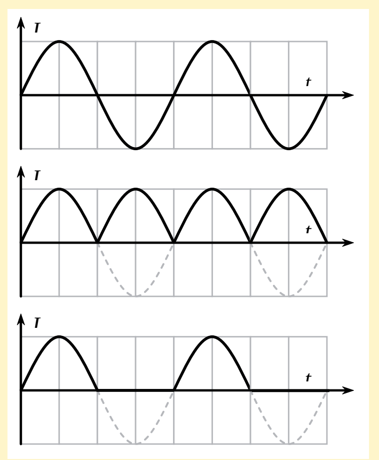
El uso de mercurio en las válvulas permite manejar corrientes grandes, de decenas y centenares de amperes, más difíciles de lograr con el desplazamiento de electrones solos, puesto que no salen muchos electrones del cátodo caliente, mientras que los iones de mercurio se producen en mayor cantidad, al volatilizarse suficiente metal líquido con las chispas.[4]

[3] El capítulo 2 explica el origen de esas palabras.

[4] La teoría completa del porqué los iones y electrones viajan en uno de los dos sentidos, con preferencia al opuesto, es algo compleja, y se basa en la energía necesaria para arrancar electrones de la superficie de diferentes materiales, y en la distancia que recorren esas partículas antes de chocar con otras, e ionizarlas. Las válvulas de vapor de mercurio se emplearon mucho antes de que se supiera en detalle cómo funcionan. (Véase el apéndice sobre descargas en gases.)




● **Una válvula de doble placa convierte corriente alterna en corriente pulsante de polaridad constante. El primario *P* del transformador se alimenta con una tensión alterna. El secundario, *S*, tiene un punto medio y dos extremos, 1 y 2. Cuando 1 es positivo con respecto al centro, conduce la placa *a*. Cuando el positivo es 2, conduce la placa *b*. El resistor *R* recibe tensión de polaridad constante. (Se omite representar la alimentación del filamento).**

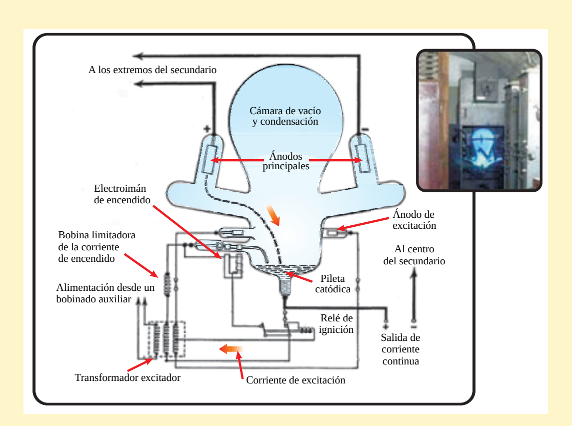



● **Tensión, en función del tiempo, en el primario del transformador.**

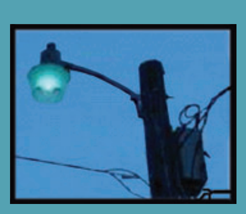
● **Tensión a la salida, sobre el resistor *R*.**

● **Tensión que habría a la salida, sobre el resistor *R*, si la válvula tuviera una sola placa.**

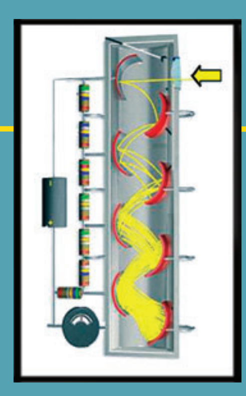
Hoy, y desde hace pocos años, el uso del mercurio se desalienta en aquellos casos en que se puede sustituir por otro material que, si se dispersase, sería menos dañino para el ambiente. Pero todavía se lo emplea en antiguas válvulas de conversión de corriente alterna en continua. Ya no se fabrican nuevas, porque se las reemplaza, con ventajas, por diodos de silicio, que se describen en capítulos siguientes.




● **Vistoso aparato, de los que hay aún algunos en servicio, que convierte corriente alterna en continua. La ampolla de vidrio al vacío, del tamaño de una pelota de básquet, contiene mercurio líquido. Unos electrodos movidos por electroimanes encienden chispas eléctricas, y producen iones de ese metal. Las bobinas, con su autoinductancia, hacen que la corriente siga circulando aun cuando la tensión pasa por cero, y así el arco no se apaga. Las placas son de carbón.**

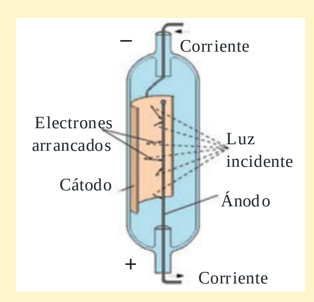


● Cuando una lámpara de mercurio se agota, suele actuar como válvula: conduce en un solo sentido, y parpadea 25 veces por segundo, la mitad de los 50 Hz de la línea.



El tubo fotomultiplicador es una ingeniosa variante de la fotocélula. La luz desprende electrones del cátodo; éstos se aceleran en un campo eléctrico, chocan contra otros electrodos, arrancan electrones secundarios, y el efecto se multiplica en avalancha. Se detecta, así, un único fotón, o partícula cuántica de luz.

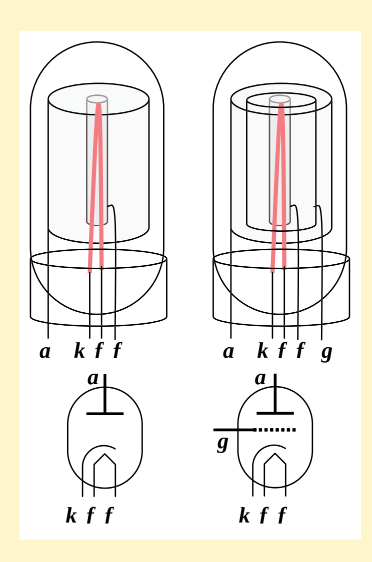
## La célula fotoeléctrica, o *fotocélula*




Hoy, por *célula (o celda) fotoeléctrica*, independientemente de cuál sea su principio de funcionamiento, se entiende cualquier dispositivo que detecte luz, como los que encienden una lámpara automáticamente cuando anochece.[5] La original, el *fototubo*, es diodo de cátodo frío, que conduce corriente a través del vacío cuando incide un haz de luz sobre su placa, que es negativa, a diferencia de la del diodo de Edison, conectada al positivo.

La fotocélula se usaba –y aún se usa– en la industria, y tuvo gran valor teórico en 1905, cuando Albert Einstein dio una explicación cuántica de su funcionamiento: para arrancar un electrón, un fotón tiene que tener una energía igual o mayor que el trabajo que cuesta separar el electrón de la superficie de la placa.

## Control del flujo electrónico con una reja, o grilla




Al principio por pura curiosidad, y después con objetivos inmediatos muy definidos en la amplificación del sonido y de las ondas de radio, los investigadores agregaron más electrodos a la primitiva válvula de vacío, con el fin de controlar el flujo de electrones entre el cátodo y el ánodo.

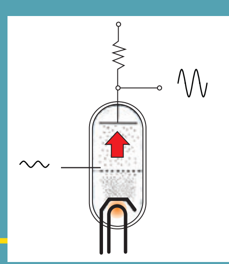
A la izquierda, una válvula de calentamiento indirecto. El filamento incandescente, **f f**, calienta una vaina cilíndrica, el cátodo ***k***, el cual emite electrones, que atrae la placa o ánodo ***a***.

A la derecha, entre el cátodo y el ánodo se agrega una rejilla o grilla ***g***, que se mantiene negativa con respecto al cátodo. Con eso la grilla rechaza los electrones que emite el cátodo, y la corriente de placa es pequeña, y a veces nula.

El agregado de la reja brindó un efecto muy ventajoso, que permitió construir el primer amplificador electrónico. Cuando la tensión de la grilla varía muy poco, digamos desde –5 V hasta –4 V, la corriente que circula por la placa varía mucho,

[5] Los más comunes hasta hace diez años eran los fotorresistores, de un material cuya resistencia eléctrica cambia con la iluminación. Actualmente se usan fotodiodos, unos cristales que conducen corriente en un solo sentido cuando les da la luz, y en ninguno a oscuras. También hay fototransistores, de funcionamiento semejante.

por ejemplo desde 50 mA hasta 240 mA. Entonces, si esa corriente circula por un resistor de 1.000 Ω, la tensión varía de 50 a 250 V. Así, una variación de 1 V se convierte en una variación de 200 V, que es mucho mayor. A todo esto, la corriente de grilla es nula, o insignificante, por lo que se amplifican señales de muy débil potencia. Nació así, en 1904, el *triodo amplificador*.



- Funcionamiento del triodo amplificador. La grilla, negativa con respecto al cátodo, rechaza los electrones, y les dificulta el libre paso hacia la placa. Cuando la tensión de la grilla varía, el flujo de electrones cambia a la vez. La grilla actúa como una compuerta, que se puede abrir y cerrar con pequeño esfuerzo, y controlar con ella un gran caudal.

## El triodo

Muchos opinan que la verdadera revolución de las comunicaciones[6] comenzó en 1904, y no en 1800 con la pila eléctrica de Alessandro Volta, cuya consecuencia en ese campo, la aparición del telégrafo Morse, demoró 35 años.

El triodo se difundió velozmente, y se le hallaron pronto variadas aplicaciones. Se usó para amplificar el sonido en estaciones de tren, salas de espectáculos y estadios deportivos; y para generar ondas de radio, detectarlas desde lejos, y amplificarlas. En 1941 se emplearon casi veinte mil triodos diminutos, no más grandes que un foquito de linterna, para construir la primera computadora electrónica, Eniac *(Electronic Numerical Integrator And Computer)*[7], para uso militar. En 1950, varios años después de terminada la Segunda Guerra Mundial, se construyó una máquina de aplicaciones pacíficas y más amplias, Univac I *(Universal Automatic Computer I)*. Fueron años de gran crecimiento tecnológico y científico.

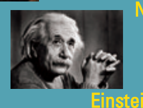
## Amplificador de triodo, el primer amplificador electrónico



Dryden



Newton



Einstein

- La frase: *"Año milagroso"*, es de un poema de 1667 de John Dryden, que se refiere a la sobrevida de Londres a la peste y el incendio. Se usó después en latín *(annus mirabilis)* para calificar la producción científica de Isaac Newton en 1684; y hace poco, para conmemorar los trabajos de Einstein de 1905.

Para usar un triodo como amplificador (por ejemplo de sonido) es necesaria, en primer lugar, la señal[8] eléctrica que se quiere amplificar, como la que provee un micrófono, por sí misma insuficiente como para accionar un parlante.

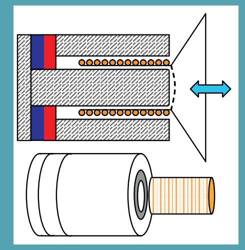
Hace falta, también, una tensión pequeña, por ejemplo 6 V, para alimentar el filamento del triodo. Además, se necesita una tensión bastante mayor, 100 ó 200 V, para alimentar la placa. Por último, se usa una tensión pequeña, para polarizar la grilla, negativamente, con respecto al cátodo

La figura muestra un posible esquema de un amplificador de triodo. Una batería de 6 V alimenta el filamento calefactor. Una de 75 V, polariza la placa a través

[6] Al año siguiente, en 1905, Albert Einstein enunció su célebre teoría de la relatividad, y obtuvo el Premio Nobel de Física por explicar el efecto fotoeléctrico, fenómeno por el cual la luz arranca electrones del cátodo frío de un diodo de vacío. El invento del triodo formó parte de una serie de trabajos muy fértiles en ciencia y tecnología.

[7] En ese año se empieza a usar la palabra *computadora*, que en España llaman ordenador.

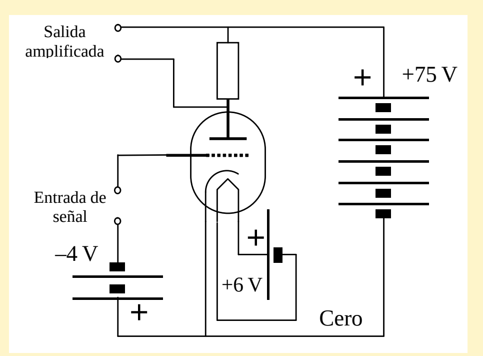
[8] En este ámbito llamamos *señal* a cualquier tensión, corriente, u otra cantidad eléctrica variable y de pequeña magnitud, portadora de información.



Los parlantes más comunes tienen una bobina móvil inmersa en un campo magnético. Cuando por la bobina pasa una corriente variable, aparece sobre ella una fuerza también variable, que hace que la bobina vibre y, con ella, también un cono flexible solidario, que produce entonces sonido.
Los parlantes son reversibles. Si se habla frente al cono, éste vibra, acompañado por la bobina móvil. Como se mueve en un campo magnético, en sus espiras se induce una fuerza electromotriz, que se puede amplificar con un triodo, para alimentar otro parlante.

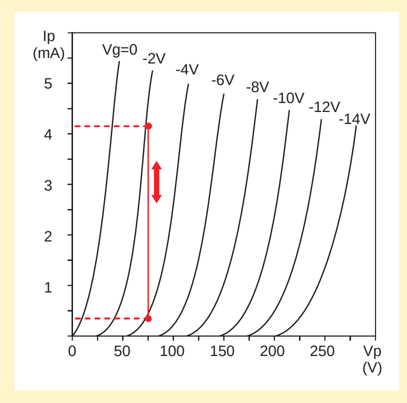


Doble triodo 2C34, fabricado por la Radio Corporation of America (RCA).




de un resistor limitador de corriente. Otra, de poca tensión, polariza negativamente la grilla. Cuando a esta última tensión, se le suma la tensión alterna de la señal de entrada, la válvula conduce proporcionalmente, y entre los extremos del resistor aparecen cambios de tensión mucho mayores que los de la señal, pero de la misma forma de variación en el tiempo.

El gráfico representa, para un cierto triodo, la corriente de placa, $I_p$, en función de la tensión de placa, $V_p$, para varias tensiones diferentes de grilla, $V_g$. Por ejemplo, si la tensión de placa es de 75 V, cuando la tensión de grilla varía entre –2 V y –4 V, la corriente de placa cambia entre 0,4 mA y 4,2 mA. Si estas corrientes circulan por un resistor de 10.000 ohm, la tensión en ese resistor varía entre 4 V y 42 V, o sea 38 V. La señal que ingresa por grilla se amplifica, en este ejemplo, 19 veces.




En vez de tres baterías, se puede usar una sola fuente de alimentación, con varias salidas.

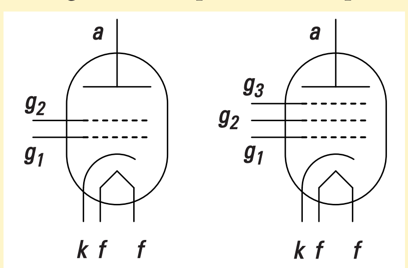
La ganancia, o factor de amplificación de un triodo, se designa con la letra griega $\mu$ (mu), y depende de las características constructivas, de la resistencia en serie con la placa, y de las tensiones con las que se polarizan ésta y la grilla. Un valor típico es 50. Si se quiere una ganancia mayor, se pueden disponer varios triodos, uno a continuación de otro, y se obtienen así ganancias de un millón, o más. En ese caso hay que blindar las conexiones con mallas o escudos conductores, para amplificar solamente las señales, y no también los ruidos.[9]

Un truco de los reparadores de radios y amplificadores para probar una válvula, era apoyar un dedo en el casquillo de la grilla. Si la válvula funcionaba, se oía un zumbido fuerte por el parlante, resultado de la amplificación de la corriente alterna captada por el cuerpo de la persona, en un ambiente poblado de cables de alimentación eléctrica.

[9] Algunas de las válvulas de la foto de la primera página de este capítulo, tienen como blindaje una capa de pintura metálica. La conexión de la grilla se hace por arriba, para alejarla de otros cables que podrían causar perturbaciones. Los blindajes de chapa metálica son más efectivos.

## Sucesores del triodo: tetrodos y pentodos

El agregado de más grillas entre el cátodo y el ánodo, mejoró mucho lo que se conseguía con el primitivo amplificador de triodo.

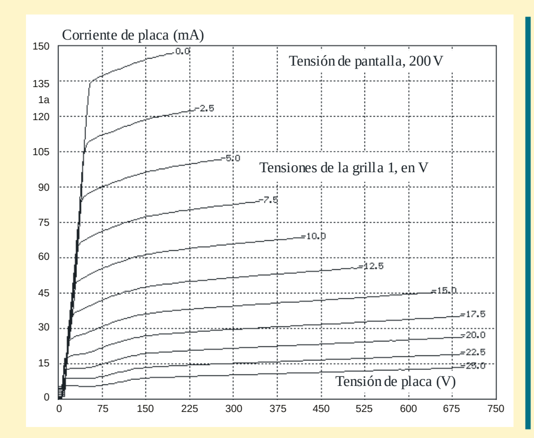



**Válvulas tetrodo y pentodo. *f f*: filamento; *k*: cátodo; *a*: ánodo; $g_1$: grilla sensible; $g_2$: grilla pantalla; $g_3$: grilla supresora.**

El tetrodo tiene dos grandes ventajas con respecto al triodo. Una de ellas es la mayor linealidad (o proporcionalidad) entre la entrada y la salida; eso implica una menor distorsión. Y la otra es su mayor ganancia, o coeficiente $\mu$ de amplificación.

La primera grilla, igual que en el triodo, es la del control del flujo de electrones, del que depende la amplificación. Se la polariza una tensión pequeña y negativa con respecto al cátodo. La segunda grilla, llamada *pantalla*, se mantiene a una tensión fija, positiva con respecto al cátodo, y a veces mayor aun que la de placa. Su función es la de disminuir los efectos de la capacitancia entre la primera grilla y la placa, indeseable en las aplicaciones de alta frecuencia.

La tercera grilla se llama *supresora*, porque suprime la nube de electrones secundarios que se forma en las cercanías de la placa, como consecuencia de la gran velocidad con la que chocan contra ella los electrones que emite el cátodo. La grilla supresora, de trama muy abierta, se suele conectar, directamente, al cátodo, y como está muy cerca de la placa, genera un campo eléctrico intenso; eso facilita que los electrones secundarios retornen a la placa, en vez de formar alrededor de ella una nube negativa que altere la conducción.




**Curvas características de un pentodo, llamado así porque tiene cinco electrodos: cátodo, tres grillas, y ánodo.**
**El filamento no se cuenta como electrodo, salvo que actúe además como cátodo, como en las válvulas de calentamiento directo.**

$$S = \frac{\Delta I_P}{\Delta V_G}$$

La *transconductancia* de un triodo es el cociente entre la variación de la corriente de *placa*, y la variación de la tensión de *grilla*. Se expresa en la unidad inversa del ohm, o sea en siemens (S). En la conductancia (véase el Cap. 4) se dividen corriente y tensión de un mismo cuerpo; en cambio en la transconductancia se divide la corriente en la placa, por la tensión en otro objeto, que es la grilla.

## Aplicaciones actuales de las válvulas de vacío

A pesar de que los transistores y otros cristales semiconductores cumplen casi todas las funciones que desempeñaban las válvulas, y con ventajas de funcionamiento, tamaño, consumo y costo, éstas se siguen prefiriendo cuando se manejan grandes potencias eléctricas, como en algunas estaciones de transmisión.





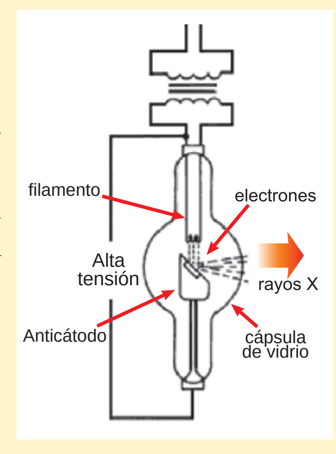
**Triodos para transmisores de radio, de vidrio y de porcelana; de treinta centímetros de largo y dos kilogramos de masa. Tienen aletas para disipar el calor; y algunos, circuitos de agua de refrigeración.**



Tubo de rayos X, con anticátodo de cobre.

Los tubos de rayos X tienen alguna semejanza con las válvulas de vacío, y se siguen usando desde 1895.

Igual que en un diodo de Edison, un filamento calienta un cátodo que emite electrones, atraídos por un electrodo conectado a unos 10.000 V positivos con respecto al cátodo. Los electrones chocan contra ese electrodo, que en el caso de los tubos de rayos X recibe el nombre de *anticátodo*, y se frenan bruscamente. Emiten, entonces, una *radiación de frenado*, conocida también por su nombre en alemán, *Bremsstrahlung*. Esa radiación es la que se conoce como rayos X, o rayos Roentgen.






Transformador de audiofrecuencia, para adaptar la salida de un amplificador de válvulas, a un parlante. A diferencia de los transformadores comunes, que funcionan con tensiones de 50 ó 60 Hz, los de audio operan con las frecuencias del sonido audible, comprendidas entre 20 y 20.000 Hz.



**Radiografía tomada en 1895 por Wilhelm Roentgen, o Röntgen (1845–1923). El sabio dio el nombre de *rayos X*, o incógnitos, a la radiación que emitía el tubo de vacío con el que experimentaba, para indicar que ignoraba por completo su naturaleza y origen. Hoy se mantiene ese curioso nombre, a pesar de que ya se sabe que son ondas electromagnéticas de longitud del orden de un angstrom ($10^{-10}$ m), aproximadamente el tamaño de un átomo.**

Además de estas aplicaciones actuales de las válvulas (técnicamente muy justificadas), hay aficionados al sonido de muy alta fidelidad que aseguran que la amplificación con válvulas de vacío es de mejor calidad que la actual de transistores; y construyen todavía amplificadores de válvula, a pesar de sus dificultades técnicas. Por ejemplo, la bobina de un parlante requiere mucha corriente y poca tensión, a la inversa de lo que entrega un amplificador de válvula: mucha tensión y escasa corriente. Entonces hay que intercalar, entre el amplificador y el parlante, un pesado y voluminoso transformador.

## Propuestas de estudio

**11.1.** La computadora Eniac tenía 18.000 triodos, y desarrollaba una potencia de 200 caballos. Un caballo equivale a 736 W. Si se construyera, con la misma tecnología, una computadora actual, de las más chicas, de sólo 500 MB (megabyte) de memoria volátil, ¿qué potencia eléctrica sería necesaria para hacerla funcionar?
**11.2.** Con los datos de las páginas 133 y 134 sobre el funcionamiento de un triodo, ¿cuánto vale su factor $\mu$ de amplificación? ¿Y cuánto vale su transconductancia?
**11.3.** ¿Qué sucedería si se polarizara, positivamente, la grilla de un triodo?
**11.4.** ¿Qué semejanzas y diferencias hay entre un diodo de válvula termoelectrónica, y una fotocélula?
**11.5.** Ya sea con los datos de este libro, o con averiguaciones independientes, por favor ordenen cronológicamente en una línea de tiempo los siguientes hechos históricos: Segunda Guerra Mundial; Primera Guerra Mundial; invención del pentodo; la del triodo; invención de la lámpara de filamento; uso del arco voltaico en iluminación; construcción de la primera computadora electrónica; uso de la luz eléctrica; uso de las lámparas incandescentes; teoría de la relatividad; primera bomba atómica; venta al público de grabadores y reproductores MP3; uso de los rayos X.
**11.6.** Las lámparas incandescentes actuales no se cierran al vacío, sino con un gas que no oxide ni ataque el filamento; como el nitrógeno, o el argón. Con eso se consigue reducir la volatilización del alambre. La lámpara consume más, porque transmite más calor, pero dura más horas en servicio. ¿Qué experimentos sencillos se podrían hacer para comprobar la presencia de gas en el interior de la ampolla de la lámpara? *(Nota: la respuesta no deriva completamente de lo expuesto en este capítulo; es necesario integrar conceptos de otros estudios: transmisión de calor por convección, o propiedades de los gases.)*



Lámparas *nixie*; así se llamaban las de gas de neón, con electrodos de la forma de cada dígito, que encendía cuando se le daba tensión con respecto a una reja frontal compartida.

## Otras fuentes de estudio e información



Antigua radio de gabinete curvo de madera, conocido como *capilla*, anterior a la época de los plásticos.

- Sugerimos buscar en Internet con las palabras: historia, electrónica, válvulas de vacío, *vacuum tubes*, museo, Eniac, Multivac.
- Charles A. Schuler, Electrónica, principios y aplicaciones, Reverté, Barcelona, Buenos Aires, 1986. Este libro incluye tanto aspectos históricos en el desarrollo de la electrónica, como los actuales.
- En este sitio muestran cómo construir un amplificador y un oscilador, con los iones de la llama de gas de una hornalla de cocina, o de un mechero. *http://www.sparkbangbuzz.com/flame-amp/flameamp.htm*
- En este otro, hay un sencillo receptor de radio hecho con auriculares, una antena y una llama de gas. Pero quizás olvidaron decir que los auriculares tienen que ser de muchas vueltas de alambre delgado, de los llamados de alta impedancia (unas decenas de miles de ohms); los de las radios y equipos de sonido portátiles no son adecuados para ese experimento. *http://www.cientificosaficionados.com/foros/viewtopic.php?f=7&t=6931.*

# Diodos semiconductores





● Las lámparas de leds, o diodos emisores de luz, prometen ser fuentes de iluminación más baratas, duraderas, rendidoras y frías que las incandescentes y fluorescentes, y más benignas para el medio ambiente.

● El faro amarillento es uno incandescente común; el azulado, de leds.



● Ducha con leds, que indican la temperatura del agua; en azul hasta los 32 °C; después verde, y en rojo a partir de los 43 °C. La luz viaja por dentro de los chorros, por el efecto de fibra óptica. Necesita una buena presión de agua, para impulsar un generador de energía eléctrica de turbina, imanes giratorios y bobina fija. Para forzar la venta del frívolo artefacto, algunos vendedores le atribuyen propiedades mágicas y curativas.

● Sencillo anuncio de 100 • 100 = 10.000 lámparas bicolores, hechas cada una con un led rojo y uno verde, encapsulados juntos. Cuando se encienden los dos colores a la vez, resulta el amarillo rojizo, o ámbar. Una computadora cambia la figura, o la anima.




LOS LEDS, IGUAL QUE OTROS DIODOS RECTIFICADORES, CONDUCEN LA CORRIENTE EN UN SOLO SENTIDO, PERO ÉSE ES UN EFECTO SECUNDARIO CUYA VENTAJA ES MARGINAL, O NULA; SU UTILIDAD PRINCIPAL ES LA DE EMITIR LUZ.

# Diodos semiconductores



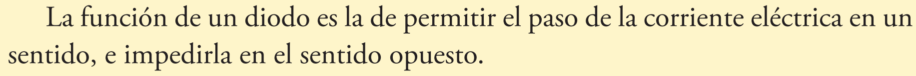
Diodo A6A 4.004, de 30 A y 400 V, y 1 cm de altura, para alternador de coche. El cuerpo estriado facilita su montaje a presión en una gruesa plancha de aluminio, para la disipación del calor (el modelo A6B es el de la polaridad opuesta).

La electrónica es el estudio del comportamiento de los electrones en diversos medios, como el vacío, los gases y los semiconductores. Esa ciencia y sus aplicaciones nacieron con el invento del diodo de vacío.[1] La electrotecnia, en cambio, es el estudio de las aplicaciones de la electricidad. La construcción de circuitos de control con válvulas, diodos y transistores, pertenece a la electrónica; en cambio las centrales, instalaciones y motores eléctricos, corresponden al campo de la electrotecnia.

Recordemos que la palabra *semiconductor* tiene un significado diferente en los ámbitos de la electrotecnia y de la electrónica. En la primera, semiconductor es un material de conductividad intermedia entre la de un conductor y un aislante. En electrónica se llama semiconductor el material que conduce o no la corriente eléctrica según cuál sea su sentido, o el que lo hace sólo cuando recibe una señal eléctrica, óptica o de otro tipo.

## El diodo semiconductor

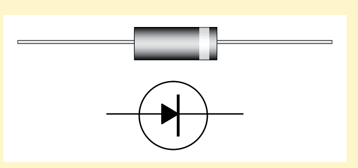
Diodo de 350 A y 400 V, de 3 cm, para soldadora de arco eléctrico.



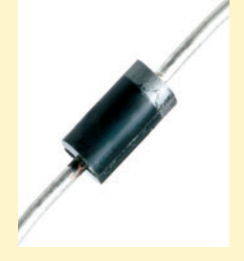
La función de un diodo es la de permitir el paso de la corriente eléctrica en un sentido, e impedirla en el sentido opuesto.

Posiblemente sea éste el componente más utilizado en la electrónica. Los más comunes se elaboran con pequeños cristales de silicio conectados a alambres de cobre estañados, y encapsulados en plástico.

Diodo miniatura ESD 0P2RF-02LS, de medio milímetro, diseñado como elemento de protección contra tensiones excesivas en equipos de comunicaciones.



**Diodo conductor, y su símbolo.**

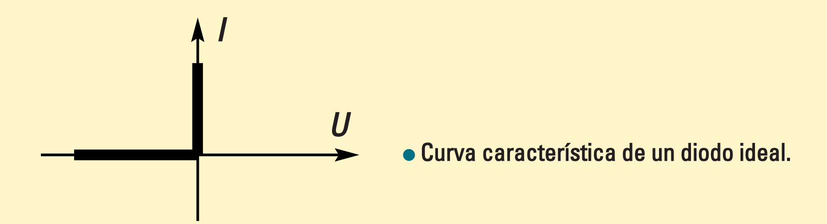


**Diodo semiconductor 1N 4.004, de medio centímetro de largo, capaz de conducir una corriente de 1 A, y de soportar 400 V de tensión inversa.**

[1] El hecho de que la electrónica se aplique hoy principalmente a las computadoras y sus redes, dio lugar a términos como correo electrónico, libro, voto, encuesta, música, juego, soporte, boletín, diseño, congreso, seminario y cerebro, electrónicos.

Su antecesor histórico es el rectificador, diodo o detector de piedra galena y bigote de gato, mencionado en el capítulo anterior.

La gráfica de la figura, *llamada curva característica*, representa la corriente que circula por un diodo ideal, en función de la tensión entre sus extremos. Cualquiera sea la tensión inversa que se le aplique, el diodo ideal no conduce, y la corriente es entonces nula. El diodo se comporta, para las tensiones de polaridad opuesta a la de conducción, como un cable cortado (parte horizontal de la gráfica).




**Curva característica de un diodo ideal.**

Aparte de lo dicho, y cualquiera sea la corriente que circule en el sentido permitido, la tensión entre los extremos del diodo es nula; o sea que el diodo ideal, para la corriente directa, se comporta como un cable (parte vertical del gráfico).[2]

En la práctica, no es del todo cierto que un diodo real conduzca sólo en un sentido, y que no lo haga en el opuesto. En rigor, conduce algo de corriente en el sentido opuesto; hay una pequeña conductancia inversa. Y esa corriente crece mucho, abruptamente, si la tensión inversa que se le aplica supera un cierto valor máximo, llamado *tensión Zener*.

Además, tampoco es totalmente exacto que el diodo deje pasar la corriente sin ningún impedimento en el sentido directo; existe una pequeña resistencia directa de conducción.

Otro límite real es el de las corrientes directa e inversa; hay un valor máximo de corriente que un diodo puede conducir sin que se destruya.

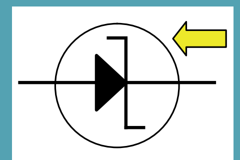
Por último, para que el diodo empiece a conducir, la tensión tiene que superar un cierto umbral, aproximadamente 0,9 V para los diodos de silicio.

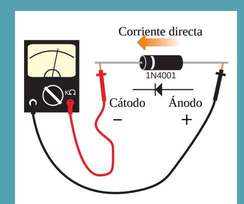
Por todo eso, la curva característica real de un diodo difiere de la ideal, y se asemeja a la de la figura de la página siguiente:

[2] Desde el punto de vista matemático, la gráfica de la figura no es una función de *I* en función de *U*, ni de *U* en función de *I*. Es una idealización de dos funciones: $U(I) = 0$ para corrientes positivas, e $I(U) = 0$ para tensiones negativas.

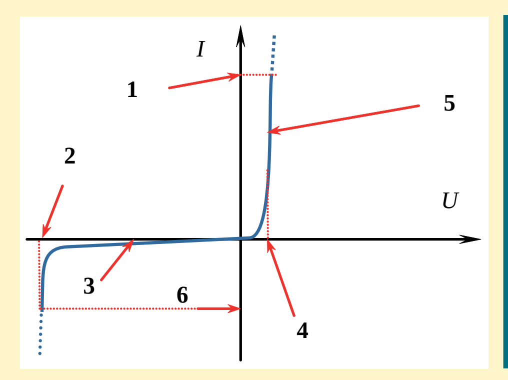


El físico Clarence Melvin Zener (1905–1993) estudió el efecto que lleva su nombre, por el cual, si la tensión inversa es suficiente, un diodo conduce al revés. Desarrolló diodos que operan normalmente en esas condiciones, y sirven para mantener una tensión constante. Abajo, el símbolo, y el sentido normal de circulación de la corriente, opuesto al de los diodos comunes.






Cuando se prueba un diodo con un multímetro o téster, hay que tener en cuenta que, con la perilla en óhmetro, y por razones constructivas, el polo positivo sale del enchufe marcado como negativo.




**Curva característica de un diodo real**

**1: Corriente directa máxima admisible.**
**2: Tensión Zener, o tensión inversa de avalancha.**
**3: La pendiente de esa parte indica la pequeña conductancia inversa.**
**4: Tensión umbral de conducción directa.**
**5: Esa pendiente corresponde a la gran conductancia directa.**
**6: Corriente inversa máxima admisible.**

En la figura no se han respetado las escalas de tensiones y corrientes. La conductancia inversa de un diodo es tan pequeña, que la parte negativa de la curva apenas se despega del eje horizontal.

**Ejemplo.** Los fabricantes de componentes electrónicos suministran datos que publican como *hojas de datos*, o *datasheets*. De una de ellas se obtuvo la siguiente información:

- el diodo 1N 4.004 tiene una tensión inversa que se garantiza en 400 V, permanentes o repetitivos. Admite picos ocasionales inversos de 480 V; soporta una tensión eficaz alterna de 280 V (su valor de pico es de 280 V × $\sqrt{2}$ = 400 V). Admite una corriente directa promedio de 1 A; y picos ocasionales de 30 A. Trabaja bien en el rango de –65 a +175 °C. Tiene una tensión umbral de conducción directa, típica, de 0,95 V, y máxima garantizada, de 1,1 V. El promedio de esa tensión directa en un ciclo, es de 0,85 V. La corriente inversa, con la tensión inversa máxima garantizada de 400 V, es de 10 microampere a la temperatura 25 °C, y de 50 microampere a 100 °C.[3]

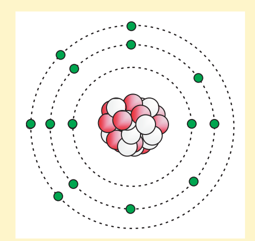
La tensión directa de conducción, para los diodos más comunes (que son los de silicio) está comprendida entre 0,6 y 1,2 V, según sus características constructivas. Para tensiones menores, el diodo se comporta como un aislante; por eso, para saber si funciona uno, hay que probarlo con tensiones mayores que la directa de conducción; a veces la de una pila es insuficiente.

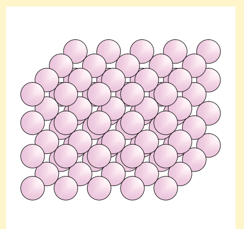
## Teoría elemental del díodo semiconductor

La explicación del funcionamiento de un diodo pertenece al campo de la física cuántica, que requiere instrumentos matemáticos y conceptuales más avanzados que los de este libro. Pero sigue igualmente una descripción parcial.

[3] La corriente inversa depende mucho de la temperatura, por eso es posible usar un diodo como termómetro.

El silicio es un elemento químico que, como el germanio y el selenio, tiene cuatro electrones en su capa más externa, cuando harían falta ocho para que fuera estable como un gas noble (en este caso el argón, de número atómico 18).



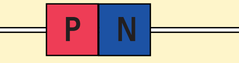


Izquierda, átomo de silicio, con 14 neutrones, 14 protones y 14 electrones. Derecha, cristal cúbico de silicio.

En un cristal cúbico de silicio, cada átomo está rodeado por cuatro vecinos (arriba, abajo, izquierda, derecha, adelante y atrás), y comparte con ellos los electrones externos; así cada uno completa ocho.

Un campo eléctrico externo arranca electrones de algunos átomos; éstos quedan con huecos de electrones, de carga positiva, que atraen electrones vecinos de otros átomos, los que se alojan en los huecos; y así, aunque los protones permanezcan en su sitio, los huecos se van a otros átomos, como se traslada hacia atrás un claro entre los coches, cuando avanzan uno a uno, en una congestión de tránsito.

Con eso, sólo tenemos un material algo conductor. Pero si cuando se fabrica el cristal se agregan pequeñas cantidades de arsénico, antimonio o fósforo, que tienen cinco electrones en su capa externa, en la red cristalina quedan electrones sobrantes. Esa operación se llama dopado; y el material resultante, silicio N. Recíprocamente, si en la fabricación de otro cristal se agregan pequeñas cantidades de aluminio, indio o galio, que tienen tres electrones en su capa externa, entonces sobran huecos, y se obtiene silicio P.



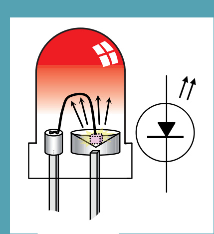

Diodo semiconductor compuesto por un cristal P y uno N, unidos.

En un átomo aislado, o casi aislado, como el de un gas, los electrones tienen permitidos ciertos niveles separados de energía, como lo indican las líneas de la figura, y les son prohibidas las energías intermedias. En un sólido, en cambio, donde los átomos están más cerca unos de otros, la energía de un electrón puede tener valores continuos dentro de ciertas bandas separadas, con una banda intermedia de energías prohibidas, como lo representan los cuadros de la figura, donde el inferior es la *banda de valencia*, y el superior, la de *conducción*. En los metales, esas bandas se solapan, por eso conducen bien la corriente. En los aislantes, las bandas permitidas están muy alejadas, y no conducen; y en los semiconductores, la banda prohibida






La tensión directa, o umbral, de un led, es de más de 2 V. Entonces, con una sola pila de 1,5 V, no enciende; y con dos en serie, se arruina.
La figura muestra una forma correcta de probar un led, con una tensión mayor que la directa, y con un resistor en serie; por ejemplo, 9 V y 1.000 Ω. La pata más larga es el ánodo, o terminal positivo.



Un led se compone de un cristal de arseniuro de galio (los hay de otras sustancias, orgánicas e inorgánicas), soldado sobre un cátodo cóncavo, que hace de espejo. Lo toca un bigote metálico soldado al ánodo. Con lupa, se pueden ver algunos detalles constructivos. A la derecha, su símbolo.

es estrecha, y los electrones pueden pasar de una banda a otra con un salto pequeño de energía.

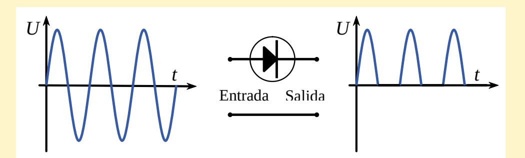
La unión PN actúa como una barrera de energía pequeña en un sentido, y de energía mayor en el opuesto; y en eso se basa la conducción en un solo sentido.




Puentes rectificadores monolíticos, cada uno con cuatro diodos encapsulados juntos. La tensión alterna se conecta entre los dos terminales indicados ~ ~, y la tensión rectificada sale por los contactos + y –. Un monolito es un monumento de una sola piedra.

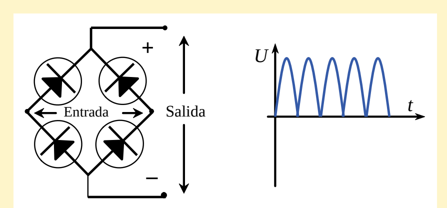
## Rectificación de corriente

La intercalación de un diodo en serie alcanza para que una tensión alterna, formada por semiciclos de las dos polaridades, resulte en una tensión de una única polaridad, aunque eso no alcance para calificarla de continua (una tensión continua debería ser aproximadamente constante, en condiciones fijas de uso).

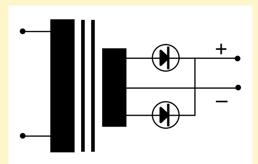



**Rectificador de media onda, que usa un solo diodo.**

Para aprovechar los dos semiciclos, se pueden usar cuatro diodos, que en esa aplicación constituyen un *rectificador de onda completa de puente de diodos*.

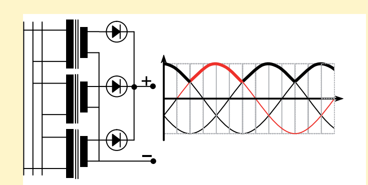



**Puente rectificador. En cada medio ciclo conducen dos diodos opuestos, mientras los otros dos impiden el paso de la corriente.**

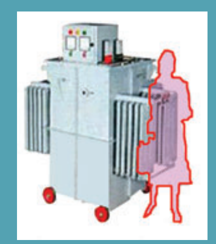



Una manera de conseguir el mismo efecto con sólo dos diodos, es usar un transformador cuyo secundario tenga un punto medio, como muestra el capítulo anterior para los diodos de vacío. Ahora representamos más simbólicamente el transformador.

A veces se dispone de tensión trifásica;[4] entonces es posible conseguir una mejor rectificación. La línea gruesa representa la tensión de salida en función del tiempo.

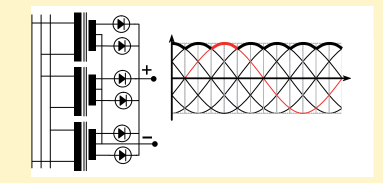



**Rectificación trifásica de media onda, también llamada de tres pulsos por ciclo.**

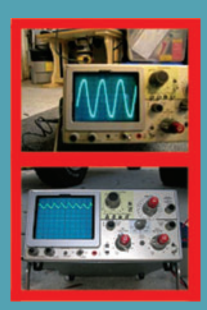


Rectificador de seis pulsos, de 3 × 380 V de entrada, y salida de tensión casi continua, de 24 V y 4.000 A. Sumergido en aceite, disipa el calor por radiadores. Se usa en la industria electroquímica; por ejemplo, para platear cobre, o para anodizar aluminio.

[4] El capítulo 5 da detalles sobre esa clase de alimentación.



● **Rectificación trifásica de onda completa, o de seis pulsos por ciclo. La tensión de salida es casi continua.**



● Rizado en la salida de un rectificador de onda completa, mostrado en la pantalla de un osciloscopio. Arriba, la tensión alterna sin rectificar.

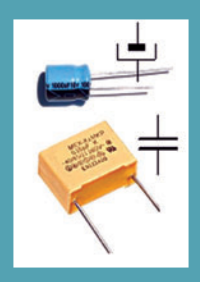
## El rizado, o *ripple*

En algunas aplicaciones, como en el caso de las máquinas comunes de soldadura de arco que se usan en los talleres, no hace falta una tensión realmente continua; la curva que la representa en función del tiempo puede estar bastante arrugada, porque sólo interesa que el arco se mantenga encendido, y para eso es suficiente con que la tensión no se anule en ningún momento.

En otros casos, como el de la alimentación de equipos de computación o amplificadores de sonido, se pretende una salida muy continua; porque la componente alterna produciría zumbidos, y otros efectos indeseables, como el reinicio sorpresivo de una computadora.

El cociente entre el valor eficaz[5] de la componente alterna, y el valor promedio de la continua se conoce como la relación de ondulación, o de rizado, y más popularmente en el ambiente técnico, como *ripple*, su nombre en inglés.

| Tipo de rectificador | Pulsos por ciclo | Rizado, o *ripple* (%) |
|---|---|---|
| Monofásico, de media onda | 1 | 121,1 |
| Monofásico, de onda completa | 2 | 48,3 |
| Trifásico, de media onda | 3 | 15,8 |
| Trifásico, de onda completa | 6 | 4,2 |

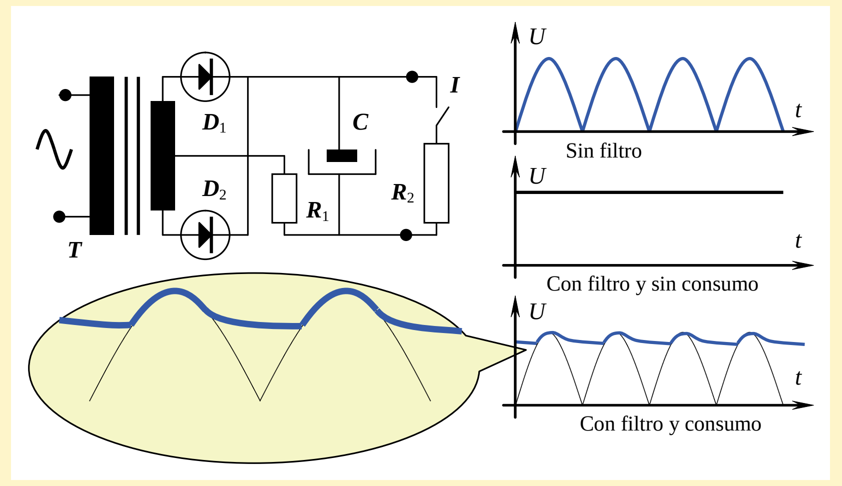


● Capacitor electrolítico de 10.000 microfarad y 10 volt, y uno de poliéster, de tamaño similar, de sólo 0,15 microfarad, aunque de 280 V; y sus símbolos.
Para igual prestación, los capacitores electrolíticos son de tamaño mucho menor. Pero sólo admiten una polaridad (un electrolito es un líquido conductor).

## Filtrado

Para reducir el rizado, o componente alterna, se puede conectar un capacitor en paralelo con la salida. Este elemento acumula carga durante los máximos, y la entrega durante los valles o mínimos de tensión, y actúa entonces como un amortiguador de las variaciones, o filtro de la componente alterna.

[5] El valor eficaz de una tensión alterna, mencionado en los capítulos 3 y 5, es aquella tensión continua que tendría el mismo efecto energético que la alterna en cuestión. Por ejemplo, una tensión que varíe de manera sinusoidal entre –311 V y +311 V, hace que un calefactor alimentado con ella, caliente lo mismo que si se lo conectara a 220 V de tensión continua; entonces el valor eficaz de una tensión alterna de 311 V de cresta, es de 220 V. Para una tensión que varíe de manera sinusoidal en el tiempo, la relación entre el valor de cresta y el valor eficaz, es igual a la raíz cuadrada de dos.




● El transformador *T*, de secundario con punto medio, provee la tensión alterna, rectificada en onda completa por los diodos $D_1$ y $D_2$. El capacitor de filtro, *C*, amortigua las variaciones de tensión. El resistor $R_1$, de baja resistencia, protege los diodos de la elevada corriente inicial de encendido o arranque. Cuando se conecta el resistor de consumo $R_2$, al accionar el interruptor *I*, aparece un rizado menor que el que habría sin el capacitor.



● La bocha hueca de la flauta india, y la bolsa de la gaita gallega atenúan las variaciones de caudal del soplido de los músicos, y brindan un sonido más uniforme. Así operan, con el rizado o ripple, los capacitores de filtro de los rectificadores.

La relación de rizado, o *ripple*, cuando hay capacitores de filtro presentes, para el caso de un rectificador de media onda, se puede calcular así, con muy buena aproximación:[6]

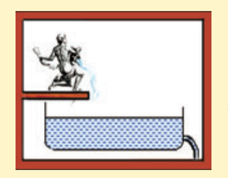
$$U_{Rpp} = \frac{U_c}{2fRC} \qquad U_{Ref} = \frac{U_{Rpp}}{2\sqrt{3}}$$

En esas fórmulas, $U_c$ es la tensión alterna de cresta; *f*, su frecuencia; $U_{Rpp}$ es la amplitud de la tensión de rizado, o sea su valor de pico a pico; *R* es la resistencia del consumo que se conecta a la salida del rectificador; *C* es la capacitancia del capacitor de filtro; y $U_{Ref}$ es la tensión eficaz de rizado, menor que la de pico a pico. Para un rectificador de onda completa, la frecuencia se debe multiplicar por dos; o, con mayor generalidad, por la cantidad de pulsos positivos que hay en cada ciclo.

## ● Analogía hidráulica

A veces una comparación hidráulica ayuda a comprender intuitivamente una idea eléctrica que se nos hace difícil por ser poco familiar.

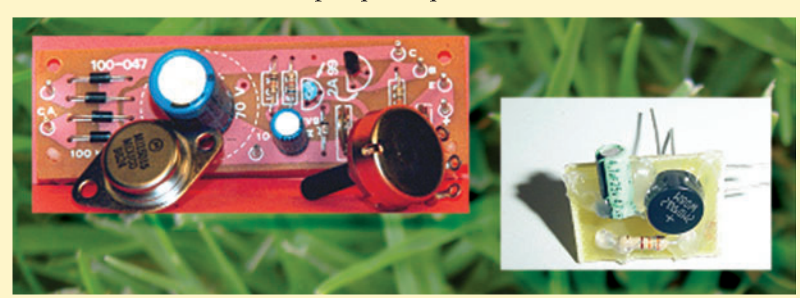
[6] La aproximación consiste en considerar que la descarga del capacitor a través de la resistencia del consumo, comienza en el mismo instante en que la tensión alterna alcanza su valor de cresta. Pero en rigor, y como se ve en la figura de detalle de la página anterior, la descarga comienza apenas después, cuando la pendiente de caída de la sinusoide iguala el valor $U_C$ /(CR).



Ganimedes[7] va y viene de una fuente, y vierte de golpe su ánfora en la tina cada vez. Pero la capacidad del tanque hace que, a la salida, se disponga de un flujo casi uniforme.

## Fuentes reguladas

Los rectificadores tratados hasta el momento utilizan *componentes pasivos*, como diodos, resistores y capacitores. Pero hay otros de muy bajo rizado y gran estabilidad de la tensión de salida frente a variaciones grandes del consumo. Son las *fuentes reguladas*, muy útiles en los laboratorios y talleres, porque se las puede poner en cortocircuito sin que la corriente exceda un valor que se fija libremente con una perilla. Esos circuitos suelen usar transistores, o amplificadores operacionales;[8] estos últimos se consideran elementos activos, porque requieren una alimentación auxiliar.




**A la izquierda, un kit para una fuente regulada sencilla. Se individualizan los cuatro diodos del rectificador de onda completa, el capacitor electrolítico de filtro, y un transistor (que se trata en el capítulo 13). A la derecha, un sencillo trabajo con un puente monolítico, o integrado, de cuatro diodos, y un filtro; todo sujeto con pistola de encolar. Este rudimentario rectificador le sirvió al aficionado para cambiarle a una bicicleta su faro original incandescente, por uno de leds, para el que poco importa el rizado. El menor consumo de los leds alivió el pedaleo nocturno del ciclista.**



El metal adicional en la parte alta de la bombilla, ayuda a enfriar el líquido muy caliente cuando sube, y a mantener tibio el tubo durante las pausas. Cumple, por eso, una función semejante a la del capacitor de un rectificador, ya que reduce, en este caso, el rizado térmico.

## Multiplicación de tensión

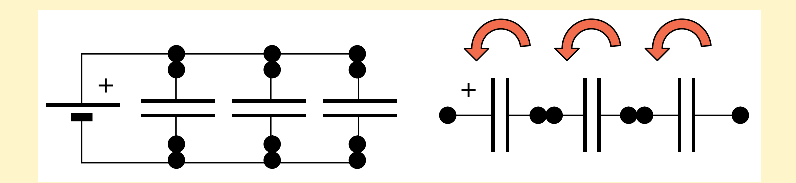
Si se tienen varios capacitores, hay una manera sencilla de obtener una tensión elevada a partir de una más baja, sin usar un transformador elevador de tensión.

Se cargan los capacitores en paralelo con la fuente de tensión continua disponible; se los desconecta, y se los pone en serie. Por ejemplo, si la pila de la figura de la página siguiente es de 1,5 V, la tensión final en la serie de capacitores, es de 4,5 V.

[7] El copero de los dioses, en la mitología griega; Aquarius en la romana.
[8] Se los trata en el capítulo 15.

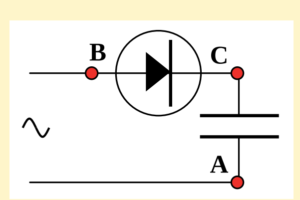


Generador de impulsos de tensión (mencionado en el capítulo 1). Cada impulso, que dura uno o dos microsegundos, es de una tensión de 300.000 V, y de una energía de 7.500 J. Con ese aparato se prueba la aptitud de aisladores y transformadores para resistir las descargas atmosféricas. Sus tres capacitores se cargan en paralelo, y se descargan en serie a través de chispas que saltan entre las esferas.

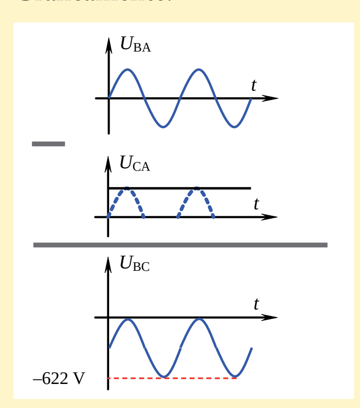


Hay antiguos generadores de alta tensión, algunos todavía en servicio, que hacen esa maniobra por medios mecánicos. Aunque los capacitores permanecen fijos, giran sus contactos, sea a mano con la ayuda de una pértiga aislante, o con un mecanismo motorizado. Hay variantes en las que la conexión en serie se realiza mediante chispas eléctricas que saltan entre esferas, y que se encienden con la ayuda de chispas secundarias, o auxiliares.

La existencia de diodos de tensiones inversas elevadas permite hoy la construcción de circuitos multiplicadores de tensión, sin la necesidad de mover piezas, ni excitar chispas. Para comprender su principio de funcionamiento es útil prestar atención al funcionamiento de un simple rectificador de media onda, en particular a las tensiones entre los puntos A, B y C. Supongamos que alimentamos un rectificador con 220 V de tensión alterna. El capacitor de filtro, si no hay ningún consumo, se cargará con la tensión de pico o de cresta de los 220 V ca, o sea con 311 V de tensión continua. Entonces, entre A y B hay 220 V eficaces de tensión alterna; y entre A y C, 311 V de tensión continua. ¿Qué tensión habrá, entonces, entre los extremos del diodo, B y C?



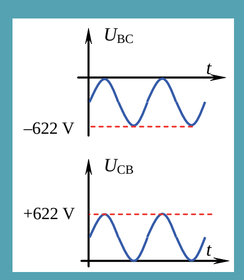

Esa tensión es igual a la diferencia entre las dos anteriores.[9] $U_{CA} - U_{CB} = U_{BC}$, Gráficamente:




cuando a la primera de las gráficas le restamos la segunda, obtenemos la tercera (restar la segunda equivale a bajar todo 311 V).

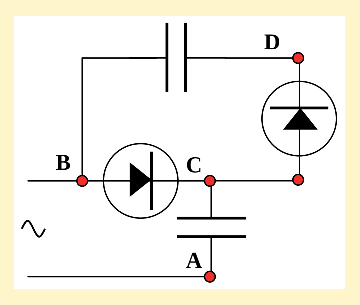
La tensión entre los extremos del diodo tiene, entonces, un valor de pico igual a –622 V, con el extremo B negativo con respecto a C.

Eso es una gran noticia, porque significa que, con un segundo diodo, podemos cargar un segundo capacitor; y así tendremos duplicada la tensión inicial.




La tensión de un punto con respecto a otro, es opuesta a la tensión del segundo con respecto al primero (nótese la permutación de subíndices en la tensión *U*). El punto C es positivo con respecto al punto B.

[9] Si eso no fuera evidente, las tensiones se pueden pensar, analógicamente, como si fueran diferencias de altitud entre ciudades. Por ejemplo, Tilcara está 1.805 metros por encima de Córdoba; y Cafayate, 1.273 metros por encima de Córdoba. Eso significa que Tilcara es 532 metros más alta que Cafayate.




Ahora el capacitor conectado entre los puntos B y D tiene una tensión continua de 622 V.

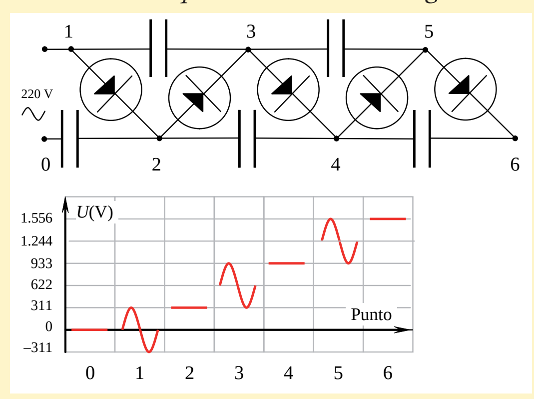
No conformes con haber duplicado la tensión, y con la intención de triplicarla, podemos agregar más diodos y capacitores. Se consigue así elevar la tensión en 622 V por cada par de capacitores.

A1
A
K
K1
A
K
A1
K1
MAS70S

Del mismo modo en que se fabrican puentes integrados de cuatro diodos, para usarlos como rectificadores, hay también pares de diodos encapsulados en serie, llamados diodos dobladores de tensión.

## Diodos en cascada multiplicadores de tensión

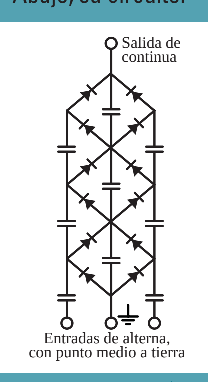
El circuito anterior, con dos diodos y dos capacitores, se conoce como *doblador de tensión*. Si se usan muchos diodos y capacitores, el circuito se llama *multiplicador de diodos*, *multiplicador en cascada*, o *generador de Marx*.[10]




**Generador de Marx, y representación, en función del tiempo, de las tensiones en cada uno de sus puntos, con respecto al cero.**



Generador de Marx de onda completa. Para alcanzar la tensión máxima, es más rápido que el de media onda.
Abajo, su circuito.




Tomemos como referencia de tensiones, o tensión nula, el punto cero del circuito. El punto 1 tiene 220 V eficaces de tensión alterna con respecto a cero (+311 y –311 de cresta). El punto 2 tiene una tensión continua de +311 V. El 4, la suma que resulta de la alterna de 220 V, con el doble de la continua de +311 V; y así sucesivamente. Salvo el primer capacitor, que debe soportar sólo 311 V, los demás se cargan todos a 622 V. Y los diodos soportan todos, igualmente, 622 V de tensión inversa de cresta.

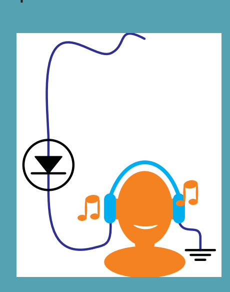
Con esa conexión se consigue, en teoría, elevar la tensión indefinidamente; pero con los siguientes límites prácticos:

- en el análisis del circuito se supuso que no hay cargas o consumos, y que por eso los capacitores llegan a adquirir completamente la tensión de cresta de la tensión alterna con la que se los alimenta a través de su respectivo diodo. Pero tanto los

[10] Esa conexión fue ideada por el Erwin Otto Marx en 1924. El apellido de ese ingeniero electricista es común en Alemania, no se relaciona con el del más famoso Karl Marx, el economista y político autor de *El capital*.



Diodo de germanio 1N100A, de 2,7 mm de diámetro, 100 V de tensión de cresta inversa 250 mA de corriente directa, 1 V de tensión directa y 1 MΩ de resistencia inversa. Su buena respuesta a las variaciones rápidas de tensión lo hace útil para detectar, sin pilas, ondas de radio, con sólo un cable que sirve de antena, y auriculares de telefonía. Hay circuitos más avanzados, para separar las estaciones.





Truco para saber si funciona el led infrarrojo de un control remoto. Se lo mira a través de la pantalla de una cámara digital, que es sensible a las ondas de 0,88 micrones que emiten esos diodos.

capacitores, como los aisladores que los sostienen, y el aire que los rodea, permiten una cierta fuga, ya que no son aislantes ideales; y aunque esa pérdida sea pequeña, alcanza para que la tensión crezca sólo hasta un límite.

- los diodos tienen, también, una débil conducción inversa que hace que los capacitores se descarguen un poco a través de ellos.
- por último, la propia instalación tiene que tener un tamaño adecuado para resistir las grandes tensiones generadas.

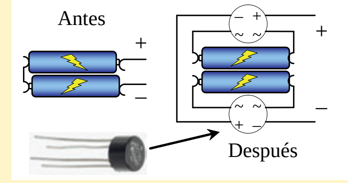
Los multiplicadores en cascada tienen muchas aplicaciones; la más común es la de los generadores de diez mil o veinte mil volt para los televisores y monitores de tubos de rayos catódicos. También se emplean en las pistolas de pintura electrostática, y en generadores de iones para desinfección, limpieza y erosión de superficies previa al pintado.

## Propuestas de estudio

**12.1.** ¿Cómo se podría proteger, con diodos y un fusible, un voltímetro diseñado para medir tensiones comprendidas entre cero y medio volt, para que no se queme en el caso de que se le aplique, por error, una tensión mucho mayor?

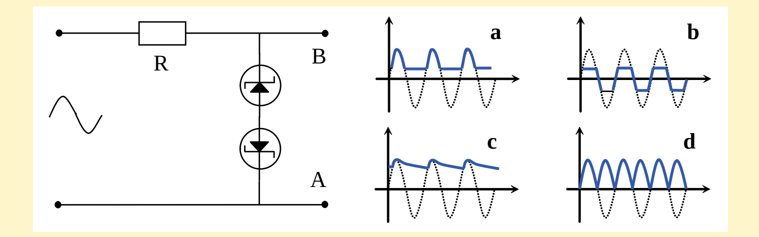
**12.2.** Además de los diodos semiconductores tratados en este capítulo, hay muchas otras clases: *varicap*, o de capacitancia variable; fotodiodos; diodos túnel, o Esaki; diodos Schokley, Schottky, y otros. Busquen, por favor, información sobre alguno de ellos, y resuman su funcionamiento y aplicaciones.

**12.3.** Una cierta lámpara incandescente de 220 V requiere una corriente de medio ampere; una fluorescente compacta, o de bajo consumo, de la misma iluminación, cien miliampere, y una de leds equivalente, treinta miliampere. ¿Qué gasto bimestral representa cada una, encendida ocho horas diarias, si el kilowatt hora cuesta quince centavos?




**12.4.** Para que un aparato alimentado con pilas funcione independientemente de la posición en que se las coloque en el receptáculo, alguien modificó el circuito serie simple, e intercaló rectificadores de onda completa. Pero encontró que eso no sirve. El aparato con pilas nuevas funciona como si las tuviera ya muy gastadas. ¿A qué se debe ese efecto?

**12.5.** ¿Cuál de los gráficos representa mejor, en función del tiempo, la tensión entre los puntos A y B del circuito de diodos Zener y resistores, alimentado con tensión alterna?



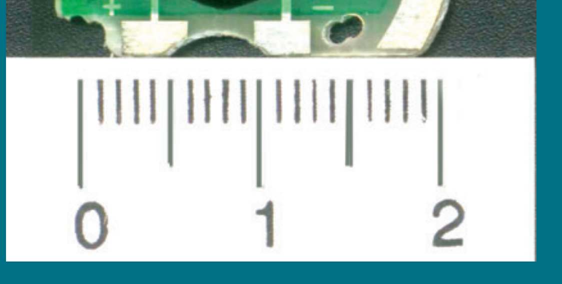

## Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en Internet con las palabras: diodo, led orgánico, ripple, radio, cuatro capas, y nuevos diodos.
- Este sitio explica cómo construir un primitivo y sencillo receptor de radio. *http://galenaxq2dwo.blogspot.com*
- Electrónica básica. Libro en soporte digital de un curso de la Euskal Herriko Unibertstatea, la Universidad del País Vasco. Autor, Andrés Aranzabal Olea; director del proyecto, Carmelo Alonso González. El capítulo de diodos contiene muchos ejemplos y aplicaciones.
  *http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec_basica/*

# Transconductancia

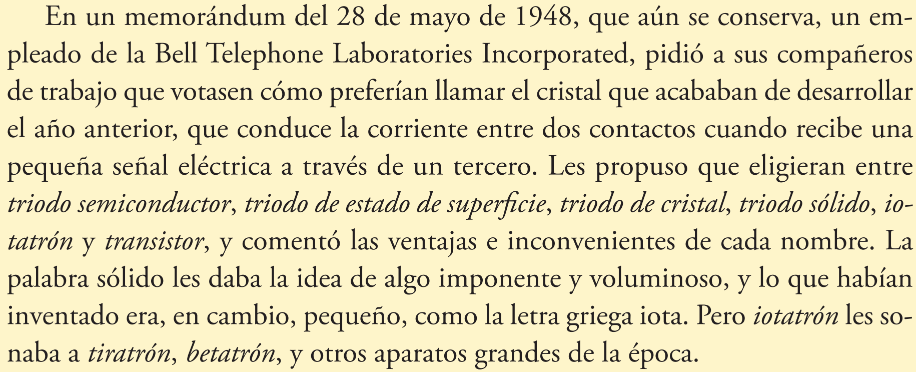


El primer triodo amplificador cristalino de la historia, o *transistor*, construido en los laboratorios Bell en 1947, pesaba más de medio kg.
Estaba formado por tres cristales de silicio de diez gramos cada uno, de dos clases diferentes, apoyados unos contra otros, y unidos a gruesos alambres de conexión eléctrica. Al lado, su símbolo.
Cuando se hace circular una débil corriente por uno de los alambres, la unión de dos de los cristales se vuelve muy conductora.




Los transistores actuales son muy pequeños, como los de este circuito de un reloj de cinco pesos. Arriba, el cristal de cuarzo, cuyas vibraciones miden el tiempo. Entre + y – va la pila. Sobre los trece contactos alineados, se apoya una pantalla de cristal líquido. A la izquierda se conecta la alarma; y a la derecha, los botones de mando. La gota de cemento protege de la luz y de la humedad más de diez mil diminutos transistores.

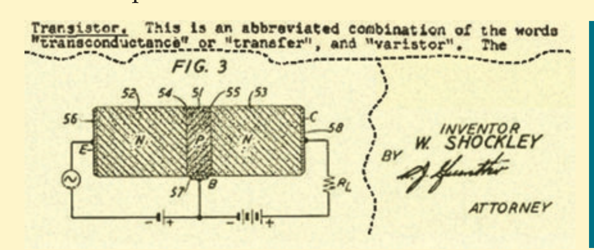
# Transconductancia



En un memorándum del 28 de mayo de 1948, que aún se conserva, un empleado de la Bell Telephone Laboratories Incorporated, pidió a sus compañeros de trabajo que votasen cómo preferían llamar el cristal que acababan de desarrollar el año anterior, que conduce la corriente entre dos contactos cuando recibe una pequeña señal eléctrica a través de un tercero. Les propuso que eligieran entre *triodo semiconductor*, *triodo de estado de superficie*, *triodo de cristal*, *triodo sólido*, *iotatrón* y *transistor*, y comentó las ventajas e inconvenientes de cada nombre. La palabra sólido les daba la idea de algo imponente y voluminoso, y lo que habían inventado era, en cambio, pequeño, como la letra griega iota. Pero *iotatrón* les sonaba a *tiratrón*, *betatrón*, y otros aparatos grandes de la época.

Se decidieron por *transistor*, contracción de *transconductancia*, o transferencia, y varistor.[1] El transistor se comporta como un resistor, pero su resistencia depende de la señal que recibe de un tercer electrodo, el de control.

- Los investigadores estadounidenses William Shockley, Walter H. Brattain y John Bardeen, de los Laboratorios Bell, recibieron el premio Nobel de Física en 1956, por su invención del transistor de contacto en 1947, y el de juntura en 1951.




- **Un fragmento del histórico memorándum, y otros de la patente estadounidense 2.569.347, de la invención del transistor.**

Es posible demostrar que si se agrega un nuevo resistor a un circuito ya existente y compuesto, exclusivamente, por resistores, la variación de la conductancia[2] entre cualquier par de puntos de ese circuito, nunca es mayor que la conductancia del elemento que se agrega.

Por ejemplo, si añadimos un resistor de 1 Ω entre los puntos C y D del circuito, la conductancia entre los puntos A y B cambia del valor inicial de 0,05 S, al nuevo de 0,0090196 S. La variación de conductancia entre A y B, debida a ese agregado, es de 0,00490196 S, que no supera la conductancia agregada, de 1 S. Y eso ocurre

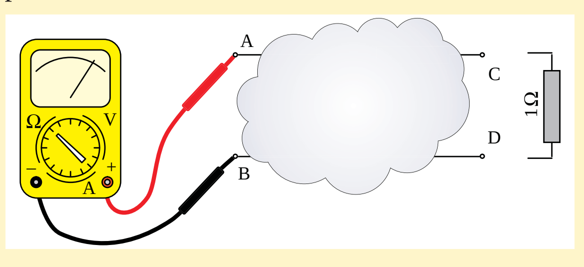


- Varistor V275LA40AP, para protección de aparatos electrónicos. Diámetro, 20 mm; tensión de trabajo, 250 V ca; la de límite, 500 V ca. Admite picos de 6,5 A, y absorbe una energía de hasta 23 J.

[1] Un varistor es un resistor variable, cuya resistencia disminuye mucho cuando la tensión supera cierto valor. Es útil para proteger equipos delicados de tensiones excesivas momentáneas. Para el mismo uso, hay capacitores cuya capacitancia aumenta mucho a partir de cierta tensión, llamados varicaps. (Muchos llaman varistores a los varicaps.)

[2] Recordemos que la conductancia, en siemens, es la inversa de la resistencia, en ohm. Las resistencias en serie se suman, lo mismo que las conductancias en paralelo.

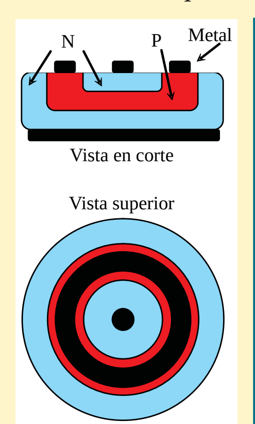
siempre, no importa qué combinación de conexiones se realice, siempre que sea de elementos pasivos que no aporten energía; que no haya, por ejemplo, un amplificador de triodo.



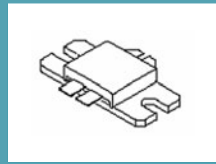

El cristal de los Laboratorios Bell no cumplía ese teorema. Inventaron un objeto tal, que si entre dos puntos C y D se le conecta un resistor de 1 Ω, cuya conductancia vale 1 S, entre los puntos A y B del mismo cuerpo, se mide un aumento de la conductancia mayor de 1 S, y mucho mayor. Su valor es cincuenta o cien veces más grande que la conductancia de entrada. El multímetro pasa de indicar una resistencia infinita, o de un valor muy alto (eso equivale a una conductancia nula, o casi nula), a marcar, por ejemplo 0,05 Ω, correspondientes a 20 S.

Ese efecto, observado más de cuarenta años antes en los triodos de vacío, se llamó, igual que entonces, conductancia de transferencia, o transconductancia.[3] Su principal aplicación fue, inicialmente, y al igual que la de los triodos, la de amplificar señales eléctricas: por ejemplo las de un micrófono, o las ondas de radio captadas por una antena.

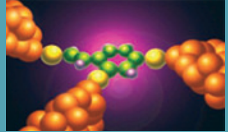
Los transistores originales eran, como los actuales, de cristales de selenio y de silicio, dopados para obtener materiales P y N.[4] El primer modelo histórico se basaba en una punta de contacto de un material sobre otro. Pocos años después se construyeron los *transistores de juntura*, en los que los materiales P y N, y el metal con los que hacen contacto, están muy íntimamente unidos. Las junturas admiten más corriente que las puntas de contacto.




● **Disposición de los materiales P y N, y los metales de contacto, en un transistor de juntura de los llamados NPN, abreviadamente N. Abajo hay una placa llamada *colector*. Depositado sobre ella, material N. Sobre éste, material P. Sobre el P, más material N. Y encima de éste, un disco de contacto, el *emisor*. Sobre el material P se deposita un anillo metálico, la base del transistor.**

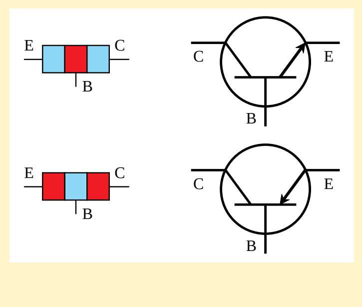


● Transistor de potencia TPV8100B, usado en transmisión. Es de polaridad N, disipa 215 W, maneja tensiones de 40 V, y corrientes de 12 A. Mide 26 mm.



● El límite inferior del tamaño de un transistor es hoy el de una sola molécula. En la Universidad de Arizona experimentan con una molécula de benceno ($C_6H_6$), a la que consiguieron unirle tres conductores, uno de ellos de control. El aparato se llama QUIET (tranquilo), por las iniciales en inglés de *transistor de efecto de interferencia cuántica*. Se podría usar para almacenar información (la representación es artística).

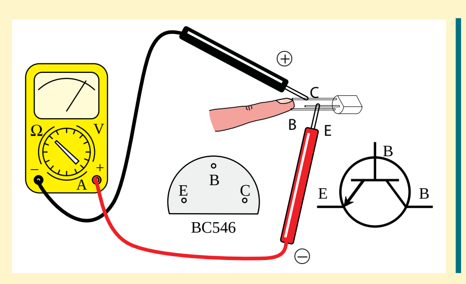
[3] En el capítulo 11, p. 135, se define la transconductancia del triodo de vacío.
[4] El capítulo anterior describe los materiales P y N, resultado del dopado de los cristales con diversos elementos químicos.




**Esquemáticamente, un transistor se puede simbolizar como un sandwich triple, o con los iconos normalizados de la figura. Los transistores N se representan con la flecha del emisor saliente; y los P, con la flecha entrante. Su funcionamiento es el mismo, y sólo cambia la polaridad (recordemos que el sentido convencional de la corriente eléctrica es de positivo a negativo).**

La figura muestra cómo experimentar con la transconductancia de un transistor cualquiera, por ejemplo uno BC546, de polaridad NPN (o N), un BC547, o BC550, similares. Esos transistores son de usos muy variados, comunes en los locales de venta, y de los más baratos; cuestan sólo centavos.

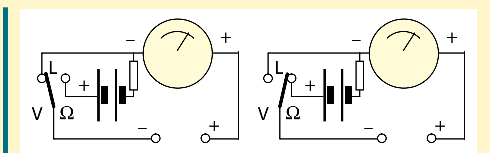
Para experimentar sirve cualquier transistor. Pero en algunos comercios de varios empleados y ventas muy organizadas, les incomoda que uno pida un transistor cualquiera, sin especificar su código, porque les lleva mucho tiempo consultar los manuales para una venta de escasa importancia. Para facilitarles la tarea se puede aclarar que queremos uno de 40 ó 50 V, de unos 100 mA, y de encapsulado TO-92.




**Con la llave del multímetro en 10.000 Ω, se conectan las puntas al emisor y al colector. La aguja indica, al principio una resistencia muy elevada. Pero al apoyar el dedo entre la base y el colector, el instrumento marca 1.000 Ω, lo que no sucede cuando se pone el dedo, directamente, entre las puntas.**

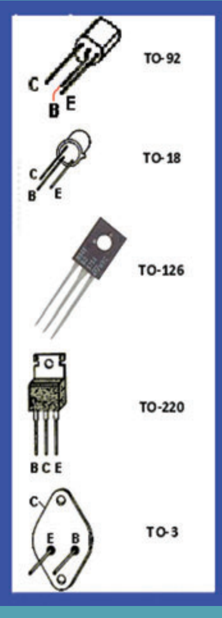
El aparente error de signos de polaridad en la figura, no es tal. En muchos multímetros, cuando se los usa para medir resistencias, el positivo aparece en el borne marcado como negativo. La figura de abajo explica el porqué.

**Con la llave L en la posición V, el instrumento mide tensiones continuas. En Ω, mide resistencias, pero el positivo de la pila aparece en el borne marcado como negativo.**

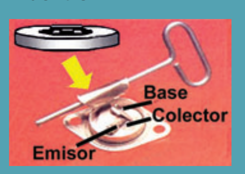



Esa contradicción entre la polaridad indicada en el enchufe, y la que se observa en la correspondiente punta de prueba, es fuente de confusión para los aficionados y aficionadas. Algunos, para tener presente la polaridad correcta, invierten la conexión de las puntas, para que la roja sea la positiva.

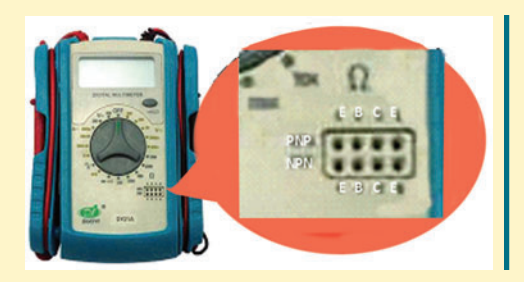
Si un fabricante de multímetros quisiera evitar ese efecto, debería usar una llave de selección de contactos de más pisos; más voluminosa y cara, sin que su




Algunos de los distintos tipos de encapsulado de transistores. Los más grandes, metálicos, son para potencias grandes, y se montan sobre disipadores de aluminio, con una grasa especial conductora del calor. Las letras TO significan *transistor outline*, o croquis de transistor.
Abajo: transistor por dentro.



beneficio sea realmente importante, porque la mayoría de los usuarios emplea el óhmetro sólo para medir resistencias, y no para probar transistores. Para esta función, los multímetros algo avanzados tienen uno o dos zócalos especiales para enchufar los transistores, según su polaridad. Su factor de amplificación se lee directamente en la pantalla.



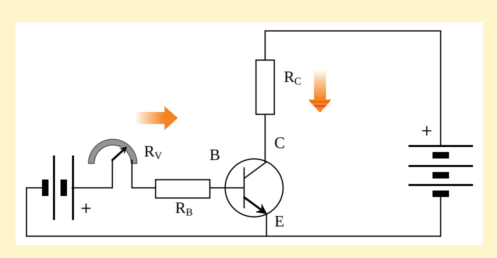

**● Multímetro con zócalo de prueba de transistores, con contactos repetidos, útiles para no tener que doblar las patas, según el orden en que estén dispuestos el emisor, la base y el colector.**



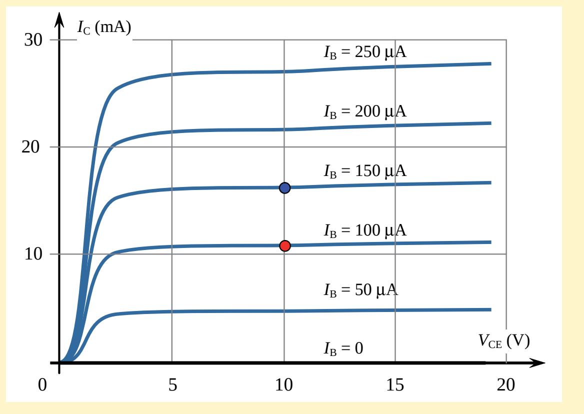
● Los resistores variables de cursor deslizante se conocen como *potenciómetros* en el comercio. Los hay helicoidales, de unas diez vueltas, llamados *helipot*. A los más chicos les dicen de preajuste, y más comúnmente, *presets*.

## ● Curvas características de un transistor. Coeficientes alfa y beta

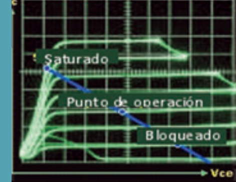
Las curvas características de los transistores facilitan el diseño, el uso y la reparación de equipos electrónicos. El circuito de la figura, aunque carece de aplicación práctica, sirve para determinarlas,[5] o para comprender su significado.




Con la batería de la izquierda y un resistor variable a voluntad, $R_V$, se hace circular una corriente a través de la juntura base–emisor. Eso hace que circule una corriente mayor entre el colector y el emisor. Esta corriente, $I_C$, depende de la tensión de la batería de la derecha, de la resistencia del resistor colocado en serie con el colector, $R_C$, y de la corriente de base, $I_B$.




Por ejemplo, cuando la tensión entre el colector y el emisor es de 10 V, y la corriente de base es de 100 μA, la corriente que pasa por el colector vale unos 11 mA (punto rojo en la figura). Si la corriente de base sube a 150 μA, la




● Curvas características de un transistor, trazadas, automáticamente, en la pantalla de un osciloscopio. Arriba, en conducción plena, o saturación; abajo, sin conducción, o corte; en el centro, el punto de operación normal, en el cual el transistor es sensible a la señal de entrada.
Por la presencia del resistor $R_C$, cuando aumenta la corriente de colector, disminuye la tensión entre el colector y el emisor; eso lo representa la recta azul, o recta de trabajo del transistor.

[5] En la práctica, y salvo en laboratorios de enseñanza, se usa muy poco ese método manual de tomar los datos para el trazado de las curvas características. Hay aparatos que hacen eso automáticamente, y muestran el resultado en una pantalla.

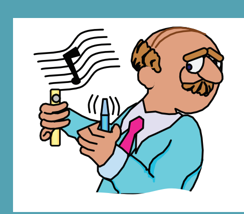
corriente de colector asciende a unos 16 mA (punto azul). La diferencia de corrientes de base es de 50 μA, mientras que la diferencia de corrientes de colector es de 5 mA, ó 5.000 μA. Entonces, la ganancia de corriente, si se usara ese transistor como amplificador, sería de un factor cien. Ese factor se llama el *coeficiente beta* ($\beta$) del transistor. De modo análogo, se define un coeficiente alfa ($\alpha$), como el cociente entre la variación de la corriente de colector, y la variación de la corriente de emisor.

Si se tiene en cuenta que la corriente de emisor es igual a la suma de las corrientes de base y de colector, resultan las siguientes relaciones:

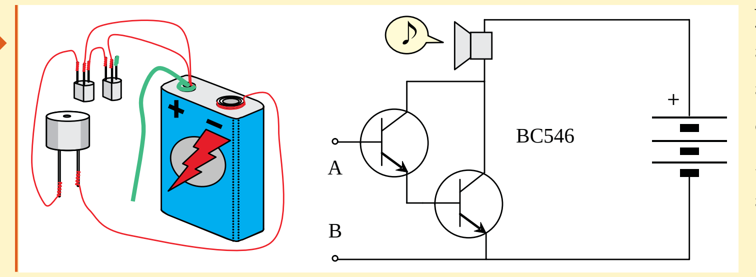
$$\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_E} \qquad \beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_B} \qquad I_E = I_c + I_B \qquad \alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \qquad \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

Los transistores se pueden conectar uno a continuación de otro, y así multiplicar las ganancias. El circuito de la figura, ideado por Sidney Darlington en 1950, tiene tanta ganancia, que detecta la proximidad de un cable de corriente alterna sin necesidad de establecer contacto con él.

Se usan dos transistores N cualesquiera, una batería de 9 V, y un zumbador, o *buzzer*, con oscilador incorporado. Si se toma uno de los cables verdes con la mano y se acerca el otro a un cable de un artefacto, sin necesidad de pelarlo ni de tocarlo, el aparato suena.



- El circuito descrito a la derecha detecta el movimiento de un bolígrafo frotado contra la ropa. También se puede experimentar la conducción de la corriente a través de la llama de un encendedor. Y, con contacto directo, se detectan grados muy pequeños de humedad en papeles y maderas. El sencillo aparato es sensible a los campos eléctricos de las líneas aéreas.

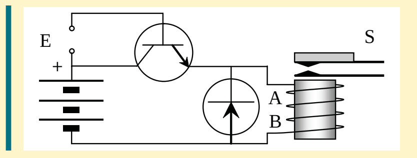



## Carga inductiva en circuitos con transistores

A veces, se usan transistores para accionar un relé,[6] cuyos contactos manejan corrientes y tensiones que serían excesivas para el transistor. En ese caso es necesario poner un diodo en paralelo con la bobina del relé, para evitar que aparezcan tensiones muy elevadas como consecuencia de las variaciones rápidas de la corriente que pasa por la bobina, cuya autoinducción es importante.[7]



- Farol de exterior. Por economía, se enciende sólo cuando el sensor infrarrojo detecta la presencia humana. El foco es de tanta potencia (500 W), que conviene que no lo maneje, directamente, un transistor, sino un relé electromecánico, cuyo clic se oye cuando actúa. La bobina del relé lleva un diodo, para protección del circuito.



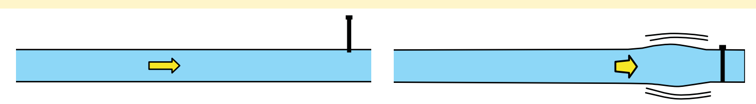

- **E: entrada de señal, o conexión de una gran resistencia. S: contactos de salida. Sin en diodo, cuando la corriente disminuye rápidamente, en la bobina del relé se inducirían tensiones elevadas.**

[6] El funcionamiento de un relé se describe en el Cap.8.
[7] La autoinducción se trata en el Cap. 8.

Una manera de entender la función de ese diodo de protección, es imaginar que la corriente cae a cero bruscamente. Entonces se genera una fuerza electromotriz de autoinducción, cuyo sentido es opuesto al de la variación de la corriente: el extremo *B* de la bobina del relé, se hace positivo con respecto al extremo *A*. En ese caso, el diodo conduce, y limita la tensión a menos de un volt. Sin el diodo, pueden aparecer miles de voltios, y dañarse el transistor.

## Símil hidráulico con la bomba de ariete

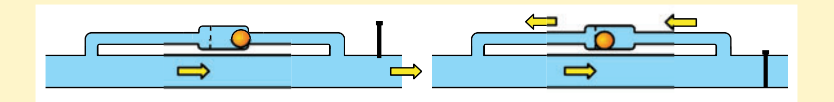
Otra manera de captar intuitivamente la función del diodo de supresión de tensiones excesivas, es comparar ese efecto con uno similar en un circuito hidráulico. Imaginemos un caño largo horizontal por el que circula agua velozmente; y que, en cierto instante, alguien cierra, bruscamente, la esclusa.



La consecuencia de esa maniobra, por la inercia del líquido, es la generación de una gran presión, especialmente, si el tubo es largo, y la velocidad alta.

Ese efecto se conoce como *golpe de ariete*, y era causa de daños en instalaciones de agua mal diseñadas. Pero también tiene aplicaciones útiles, para bombear agua en ríos rápidos: Se deja que el agua tome velocidad en un tubo sumergido en el lecho del curso de agua, se tapa rápidamente el extremo de adelante, y se aprovecha el golpe de presión para subir el agua a un tanque. Pero aquí nos interesa comparar ese efecto hidráulico, con el eléctrico.

Una manera de evitar la presión excesiva cuando se cierra bruscamente la compuerta, es poner una válvula de sentido único, como indica la figura.



En la condición normal de conducción de agua, la válvula de un solo sentido está tapada, y por el brazo paralelo no hay circulación. Cuando se cierra la compuerta bruscamente, la presión en ese sitio hace que la válvula de un solo sentido se abra y permita la circulación del agua hacia atrás, con eso, se alivia la presión, y el caño no se esfuerza. El agua sigue circulando durante un breve tiempo, por inercia, hasta que las pérdidas detienen el líquido. Pero el caudal de salida cesa en el mismo instante en que se cierra la compuerta.



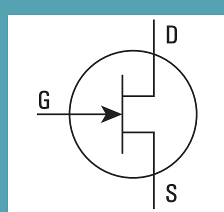
Ariete es el diminutivo de aries, el carnero en latín, y el nombre del tronco para derribar las puertas de las fortalezas. Los antiguos adornaban la punta con cuernos de carnero, porque creían que así el arma cobraría la fuerza con la que los machos de oveja topan con sus contrincantes en la disputa por hembras y territorio. Todavía hoy, algunos cuelgan cuernos en sus vehículos, para que les den suerte en los choques.



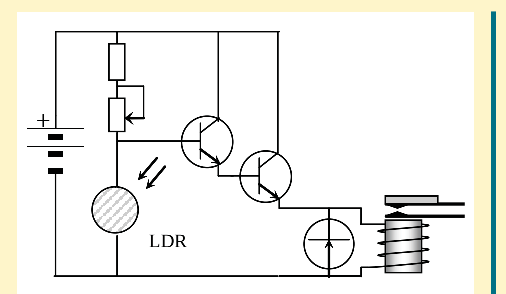
Para energías altas, los diodos resultan insuficientes para limitar las tensiones excesivas. Los descargadores de gas limitan la tensión a valores convenientes, como 100 V para un módem, o 350 V para un televisor.
El de la figura, de un centímetro, se conecta a los dos polos de la línea, con el centro a tierra.

De modo similar, en el circuito electrónico, el diodo de supresión de tensiones excesivas, normalmente, no conduce; y cuando la corriente cesa de súbito, la fuerza electromotriz que aparece en la bobina del relé hace que la corriente siga circulando a través de ella y del diodo, en círculo cerrado, hasta que las pérdidas por la resistencia eléctrica la debilitan, y la corriente cesa. El relé queda tomado, o en contacto, por un breve tiempo después de que el transistor dejó de conducir. Vuelve a su posición de reposo con una fracción de segundo de retardo.

En esta comparación, el caudal de agua se identifica con la corriente eléctrica, la compuerta que corta el caudal, con el transistor que interrumpe la corriente; y la presión grande en el caño y entre los dos lados de la compuerta, con la tensión elevada en la bobina y entre el emisor y el colector del transistor.



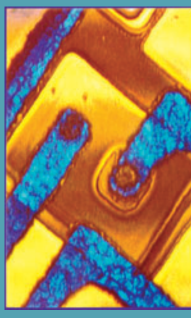

● Los FET (iniciales, en inglés, de *transistores de efecto de campo*) tienen un principio de funcionamiento diferente al de los transistores de unión. La conducción entre la fuente (S) y el drenaje (D) se produce por el mero campo eléctrico de la compuerta (G), sin que circule corriente por ella.




**● Circuito de encendido automático de una luz al caer la noche, basado en una LDR (*light dependant resistor*), o fotorresistor, cuya resistencia varía con la intensidad de luz que recibe. El resistor variable de cursor, arriba, permite ajustar la sensibilidad. Nótese el diodo en oposición, para proteger los transistores de las tensiones grandes que podría generar la bobina del relé cuando la corriente varíe rápidamente, por ejemplo cuando caiga luz sobre el aparato.**

La protección de los componentes de un circuito electrónico contra las tensiones excesivas que puedan sufrir, es un problema de solución difícil, al punto de que los fabricantes de equipos suelen poner de manera explícita en sus garantías, que éstas no cubren los daños sufridos como consecuencia de descargas atmosféricas, anormalidades en el suministro eléctrico, caída de cables de energía sobre los telefónicos o de señal, o tensiones de pico producidas por la parada de grandes motores. Los aparatos más expuestos a esos daños son las computadoras, los reproductores de discos de imagen y sonido y, especialmente los módem, a pesar de que tienen varistores y descargadores.

La experiencia industrial sostenida, y la atención de un importante historial de fallas, a veces conducen a diseños razonablemente confiables, y a la fabricación de aparatos que resisten las tensiones excesivas, o que limitan la reparación al reemplazo de un fusible.



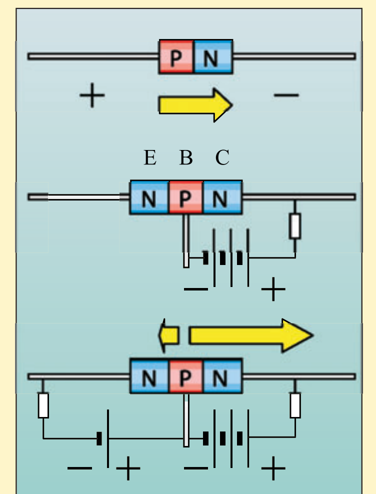
● Transistor de un micrón de tamaño (caben mil en un milímetro). En el medio, el emisor; alrededor, la base; al costado, el colector. Alrededor, más transistores. Para construirlo, se usan medios fotográficos, fotoquímicos, y de deposición de materiales evaporados al vacío.

## ● Teoría elemental del transistor

En el capítulo 12 se describió el diodo semiconductor como la unión de dos cristales del mismo elemento químico, por ejemplo silicio, cuyos átomos tienen

cuatro electrones exteriores. Uno de los cristales se dopa con arsénico, antimonio o fósforo, de cinco electrones externos, y el otro con aluminio, indio o galio, de tres electrones externos, y así resulta la unión de un cristal con exceso de electrones, N, y otro con defecto de ellos, P.

Para cierto rango de tensiones, esa unión conduce la corriente en un solo sentido, de P a N (del ánodo al cátodo), como en una válvula termoelectrónica.




En un transistor de juntura hay tres cristales: emisor, base y colector. Los extremos son de la misma polaridad; N en la figura.

Si se polariza de manera inversa la unión de la base y el colector, esa unión, naturalmente, no conduce.

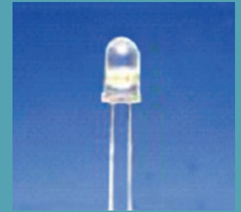
Pero si después se polariza en forma directa la otra unión, la de la base y el emisor, ésa sí conduce; se comporta como un diodo en conducción directa.

La base atrae y libera el sobrante de electrones del cristal N del emisor; esos electrones pasan al colector, que está polarizado, positivamente, con respecto a la base, y a una tensión mayor que la que existe entre el emisor y la base.

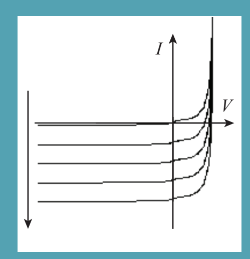
El potencial positivo de la base con respecto al emisor hace que los electrones del emisor puedan superar la barrera o salto de energía que los mantenía en ese electrodo como si estuvieran en un pozo, y pasen a una región en la que el colector los pueda atraer.[8]

El funcionamiento del transistor parece semejante al de un triodo de vacío; pero en su caso influye más, marcadamente, el carácter *cuántico* de la conducción.

La mecánica cuántica, nacida en 1916 a partir de los trabajos de Niels Bohr, Max Planck, Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg,[9] establece que una partícula no puede absorber, ni emitir, cualquier valor de energía; tiene que transferirla en paquetes, llamados *cuantos*. La energía de los cuantos es proporcional a la frecuencia de la partícula. Un hecho de la cuántica es que todas las partículas tienen fre-



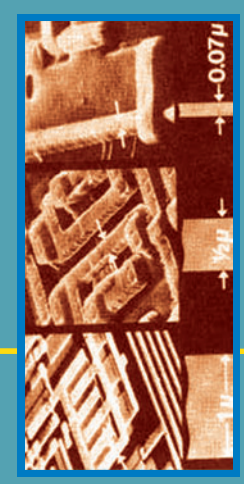
- Los diodos son sensibles a la luz, pero muchos están encapsulados en medios opacos. En cambio los leds, naturalmente, tienen encapsulado transparente; entonces se puede experimentar fácilmente con ellos. Una de sus propiedades es que la conducción directa varía con la iluminación. Otra, es que generan una pequeña tensión eléctrica, por los que se los puede usar (con un rendimiento pésimo) como celdas fotovoltaicas.




- Un led genera más de medio volt cuando le da la luz. Cuando se lo ilumina, su curva característica se desplaza hacia abajo.

[8] Tony R. Kuphaldt propone esta analogía: Una persona ubicada donde hay viento, pero no bastante para arrancar los pétalos de una flor, sopla estos y los desprende, con lo que el viento los arrastra. Del mismo modo, la base positiva del transistor desprende los electrones del emisor N, y deja que el colector los atraiga.

[9] Esos científicos nacieron, respectivamente, en Dinamarca, Alemania, Austria, y nuevamente Alemania. El entonces alemán Albert Einstein se oponía a los principios y filosofía cuánticos, especialmente en las primeras épocas de esa teoría, cuando las explicaciones de los fenómenos parecían contradictorias, y recurrían al azar (*"¡El Señor no juega a los dados!*, exclamaba, indignado"). Sin embargo, cinco años después mereció el Premio Nobel por haber hallado una explicación *cuántica* del efecto fotoeléctrico, por el cual los fotones que arrancan electrones del cátodo de una celda fotoeléctrica, tienen una energía proporcional a la frecuencia de cada una de esas partículas de luz.







Microcircuito como el de la primera página, pero sin la gota de cemento. Arriba, ampliaciones. El grosor de los contactos de los transistores es de unos 50 nanómetros, aproximadamente el de 500 átomos (un micrón equivale a mil nanómetros; y mil micrones, a un milímetro).

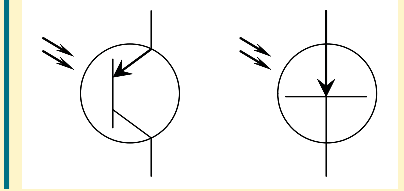
cuencia, como las ondas. Y, en rigor, no hay partículas y ondas diferenciadas; todo lo que existe tiene frecuencia, y gana o pierde energía siempre de a saltos. Esa audaz idea, después muy corroborada, chocó con la intuición y la costumbre, revolucionó la física, e influyó en el pensamiento filosófico general, al deducirse de ella que no hay causas ni efectos absolutos.

## Transistores de diferentes tipos

Desde 1947, cuando se inventó el transistor, hasta 1951 cuando se otorgaron las primeras patentes comerciales, había no más de diez tipos diferentes de transistores, según fueran de contacto o de juntura, de silicio o de germanio, o de polaridad P o N. La variedad actual es tan grande, que ni los especialistas las conocen en su totalidad, o siquiera en una gran parte, porque salen al mercado permanentemente nuevos tipos. Siguen algunos ejemplos; el capítulo siguiente menciona otros.

## Fotodiodos y fototransistores

Tanto los diodos como los transistores son, normalmente, sensibles a la luz. El efecto se consideró inicialmente un problema de interferencia en el buen funcionamiento del componente, hasta que se le halló utilidad, y se lo usó en reemplazo de las fotocélulas y los fotorresistores, con algunas ventajas.[10] El fototransistor tiene más sensibilidad que el fotodiodo.



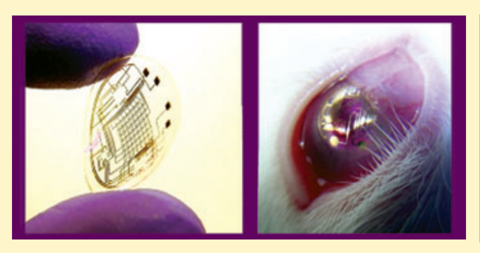
**Símbolos del fototransistor y el fotodiodo. En los modelos más comunes, el fototransistor tiene la base inaccesible. El efecto principal de la luz es aumentar su conducción.**

## Transistores emisores de luz

Tal como lo hacen los leds (diodos emisores de luz), los transistores emisores de luz, o *tels*, emiten luz cuando conducen, pero a diferencia de los diodos, admiten muy débiles señales de comando a través de sus bases. Eso simplifica la cone-

[10] Las LDR encapsuladas en plástico suelen ser sensibles a la humedad; además van perdiendo sensibilidad con el tiempo, y tardan varios segundos en recuperar su estado inicial de escasa conducción, después de haber estado expuestas a una luz intensa. Los fotodiodos y fototrensistores, en cambio, tienen una mayor velocidad de respuesta, y son más estables.

xión de las pantallas de imagen, reduce el calibre de los conductores, y permite la realización de varias funciones adicionales, entre ellas la memoria de la imagen, tal como ocurre con los transistores de la memoria de una computadora.



● Circuito impreso con transistores emisores de luz que generan imágenes enfocadas sobre la retina, desde una lente de contacto colocada en el ojo de un conejo con fines experimentales.

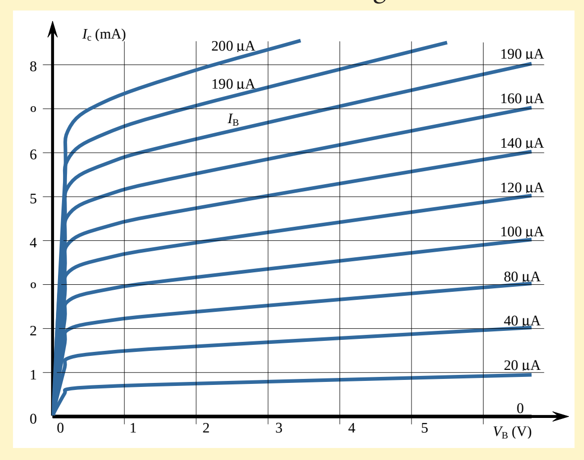
## ● Transistores de alta tensión

Sin aplicaciones muy difundidas hasta el momento, hay transistores que trabajan con tensiones de hasta 10 kV entre el colector y el emisor.

El desarrollo de nuevos tipos de transistores se orienta, principalmente, en esta época, a las comunicaciones, la computación, el almacenamiento de datos, su procesamiento, y el de las señales eléctricas y ópticas. Lo que se demanda y se busca en estos años, es mucha velocidad y pequeño tamaño.

## Propuestas de estudio

**13.1.** ¿Cuánto vale, aproximadamente, el coeficiente beta del transistor cuyas curvas características son las de la figura?




**13.2.** ¿Es posible que dos transistores tengan el mismo coeficiente beta, y diferentes coeficientes alfa? Justificar

**13.3.** Antes de que se inventaran los triodos de vacío y los transistores, se consiguieron producir y detectar ondas electromagnéticas, u ondas de radio. Averigüen por otros medios cómo se consiguió eso y cuándo sucedió este hecho.
**13.4.** Una noticia de origen dudoso afirma que, en un laboratorio consiguieron fabricar un microprocesador para computadora con una capacidad de almacenamiento de datos de un terabyte, y una frecuencia de procesamiento de un terahertz (el prefijo tera significa un billón, o $10^{12}$). ¿Será eso posible, al menos teóricamente? Como pista para dar una respuesta, consideremos que un byte equivale a ocho bits; que para almacenar un bit hacen, falta al menos, dos transistores; que el tamaño mínimo de un transistor es el de un átomo ($10^{-10}$ m), y que las señales eléctricas, como cualquier otra, tienen como límite de velocidad la de la luz en el vacío, $3 \times 10^8$ m/s.
**13.5.** ¿Qué función cumple el resistor fijo en serie con el resistor variable, en el circuito de encendido nocturno de la página 160? Como pista para hallar una respuesta, se puede considerar que la corriente de base que soporta un transistor sin deteriorarse, tiene un límite dado por el fabricante.

## Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en la Red con las palabras transistor, nuevos, transconductancia, dopaje, dopado, base, colector, emisor, compuerta, drenaje (o sumidero) y fuente.
- Este sitio ofrece una teoría elemental del transistor, con gráficos animados: *http://www.profesormolina.com.ar/tutoriales/curso_enica2/curso2.htm#16*
- Gray, Paul E. *Principios de electrónica: electrónica, física, modelos y circuitos electrónicos*, Reverté, Barcelona, 1971. En Libros Google se puede hojear una parte.

# Componentes



Iluminador, con 144 diodos emisores de rayos infrarrojos de un micrón de longitud de onda, llamada radiación infrarroja cercana. Esa fuente de radiación invisible se usa para las cámaras de TV de entradas de edificios, y de salas de hospitales.
La radiación permite ver quien llama, o cuidar pacientes mientras duermen, sin causarles incomodidad con luces intensas.
Se alimenta con una batería o una fuente de 12 V, de la que toma una corriente de medio ampere. Cuando alguien se mueve delante, la parrilla se enciende automáticamente, porque incluye un sensor pasivo que detecta los rayos infrarrojos que emite el cuerpo humano, de nueve o diez micrones de longitud de onda, llamados rayos infrarrojos lejanos.
A tres metros de distancia, el aparato alumbra una zona de tres metros de diámetro. En la esquina de abajo a la derecha, la cámara.
Muchos de esos componentes son discretos, y se consiguen sueltos en el comercio; otros, como la cámara, y el detector pasivo de movimiento, son integrados.



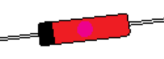
La venas traslucen mejor con rayos infrarrojos cercanos, que con luz visible ordinaria.

Foto: Dean W. Armstrong

# Componentes

0: Negro
1: Marrón
2: Rojo
3: Anaranjado
4: Amarillo
5: Verde
6: Azul
7: Violeta
8: Gris
9: Blanco
Dorado: ± 5 %
Plateado: ± 10%
Sin banda: ± 20%

- Código de colores de cuatro bandas para resistores. La primera banda representa la primera cifra, la segunda banda, la segunda cifra; la tercera banda, la cantidad de ceros que se agregan; la cuarta banda coloreada indica la tolerancia. El resistor de la figura es de 22 Ω ± 10 %.



- Antiguamente, los resistores se identificaban con el mismo código actual de colores, pero en vez de bandas el orden de lectura era: cuerpo, cabeza y punto. En la figura, un resistor de 27 Ω. Cuando no tenía punto, se suponía que era del mismo color que el cuerpo; en este caso, si faltara el punto violeta, el resistor sería de 22 Ω.

Un componente es toda pieza o elemento de un circuito o aparato electrónico, que se pueda separar del resto y tenga una función genérica. A veces se les dice *componentes discretos*,[1] para dejar en claro que son separables, los proveen sueltos y no están integrados con otros.

Un componente discreto es, por ejemplo, un resistor, un diodo o un transistor, entre muchos otros. Un componente integrado sería un amplificador, o bien el circuito procesador de un reloj, el de una computadora, o un par de transistores en conexión Darlington (descrita en el capítulo anterior).

La ventaja de los componentes discretos es la libertad de diseño que ofrecen, porque se pueden usar en muchas combinaciones, para armar circuitos de muy variados usos. Los componentes integrados, en cambio, sirven para menos funciones y, a veces, como en el caso del reloj, para una sola. Pero son más pequeños, y su costo es menor que el del conjunto de componentes discretos necesarios para cumplir igual servicio.

Entre el resistor y el procesador de la computadora hay muchos casos intermedios. En algunos, se integran pocos componentes, para lograr funciones más especializadas que las de los componentes discretos, pero todavía amplias. Los diseñadores y fabricantes determinan qué nuevas integraciones se producen para reemplazar componentes discretos por los integrados. Las primeras invenciones o desarrollos se basan en elementos separados, pero cuando alcanzan una fabricación masiva, como la de televisores, radios y teléfonos, se tiende a la integración.

Los casos que se presentan en este capítulo son sólo algunos. Los fabricantes publican las hojas de datos de los productos; y cuando son nuevos, suelen proporcionar ejemplos de aplicación.

## Resistores

Un resistor es un componente cuya función principal es la de oponerse al paso de la corriente eléctrica, o la de generar calor y es el componente que más se usa

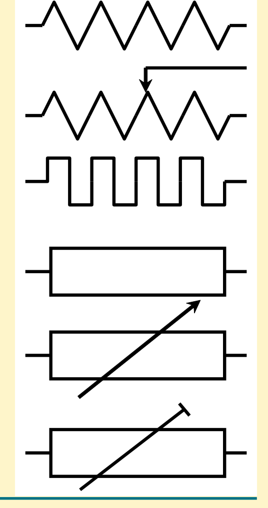
[1] *Discreto* significa separado; y es lo opuesto de continuo (*la materia, la energía y la carga eléctrica son discretas*). Se aplica también a las personas que saben distinguir lo bueno de lo malo, o son reservadas en sus actos y dichos. A *discreción* significa librado al buen juicio de cada uno.

en la electrónica y la electrotecnia. Los hay de los tamaños más diversos, desde un metro de altura y de fundición de hierro, para el freno de trenes y tranvías, hasta los de tamaño microscópico de los circuitos integrados. Hay resistores de alambre, de carbón macizo, de carbón depositado en superficies, de metales, y de materias sólidas y líquidas. Los resistores más comunes en circuitos de tamaño intermedio, son los de carbón.

Un resistor se caracteriza por su resistencia, por la tensión máxima que se le puede aplicar sin que salten chispas entre sus extremos, por la potencia que puede disipar sin destruirse, y sin exceder la temperatura permitida por el diseño, por la precisión (o tolerancia) del valor de la resistencia, y por su variación con la temperatura.

Aunque se venden resistores de, prácticamente, cualquier resistencia, conviene adaptar los diseños a los valores normalizados, que son: 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2; y sus múltiplos de potencias enteras de 10. Por ejemplo, si pedimos resistores de 500 ohm, nos recomendarán seguramente que elijamos entre 470 y 560 ohm.

Los resistores más comunes tienen cuatro bandas coloreadas que indican su resistencia, y la tolerancia de ésta, como se muestra en el recuadro. La potencia máxima admisible se sabe por el tamaño. Pero hay otros códigos de identificación, que usan cinco bandas; en ese caso hay tres bandas separadas de las otras dos, que dan las tres cifras significativas. De las otras dos bandas, la primera indica la potencia de diez por la que hay que multiplicar (o lo que es lo mismo, la cantidad de ceros que se añaden); y la última banda informa la tolerancia: marrón, 1 %; rojo, 2%; verde, 0,5%.[2] Los resistores de alambre no usan colores, porque suelen trabajar a temperaturas más elevada que los de carbón, y virarían los colores de la pintura.



La resistencia, en los resistores de alambre, se indica con números; pero algunos fabricantes, por simplicidad, reemplazan el símbolo de ohm por la letra R; los millares los indican con la letra K; y los millones, con M; y no usan ni coma ni punto decimal. Por ejemplo, 4R7 significa 4,7 Ω; y 4K7, 4.700 Ω.

Los símbolos de los resistores son los indicados en la figura. La línea en zigzag representa, de manera simplificada, un solenoide, es decir, un alambre bobinado alrededor de un cilindro aislante. Más abajo, el símbolo de un resistor ajustable.

[2] Nadie se confundiría e interpretaría esa banda verde con un cinco por ciento de tolerancia, porque si tal fuera el caso, sería ocioso suministrar tres cifras significativas.



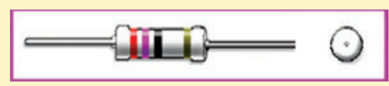
Resistores para tensiones elevadas. El de la izquierda es de 3,3 MΩ ±10%, y soporta 5 kV. La deposición de carbón en forma de hélice permite alcanzar altos valores de resistencia.



Resistores de alambre ajustables, de brida deslizante. El contacto de la brida ajustable es más firme que el deslizante de un potenciómetro, pero también más incómodo. Estos componentes se usan cuando hay que hacer ajustes sólo una vez.

En ciertas aplicaciones de alta frecuencia, un resistor de solenoide presenta efectos inductivos importantes, que suelen ser indeseables. Se usaban, por eso, resistores de alambre en los que, en vez de estar arrollado, iba y venía en cada vuelta, para reducir la inductancia. Eso lo representa el tercer símbolo, el de la guarda griega. El cuarto, el rectángulo, es el símbolo habitual de un resistor, cuando no viene al caso aclarar si es o no inductivo, o cuando se sobreentiende que no lo será en alto grado, por ser de carbón, y no de vueltas de alambre. Más abajo, más símbolos de resistores ajustables o variables; el último indica que el ajuste se realiza con un destornillador, y no mediante una perilla, como los resistores de ajuste o *presets* mencionados en el capítulo anterior. Cuando junto al símbolo hay un número sin unidades, se supone que indica la resistencia en ohm.

La potencia que pueden disipar los resistores depende del tamaño, de la ventilación si están al aire, y de las características del medio en el que puedan estar sumergidos, o encapsulados. La tabla siguiente da la potencia máxima en aire quieto, para los tipos más comunes de resistores.



| Tipo | Longitud mm | Diámetro mm | Potencia W | Tensión (V) Normal | Tensión (V) Máxima momentánea |
|---|---|---|---|---|---|
| R 16 | 3,2 | 1,8 | 0,16 | 250 | 400 |
| R 25 | 6,2 | 2,3 | 0,25 | 300 | 600 |
| R 50 | 6,5 | 2,3 | 0,5 | 350 | 700 |
| R100 | 15,0 | 6 | 1 | 400 | 1000 |

## • Diodos emisores de infrarrojo

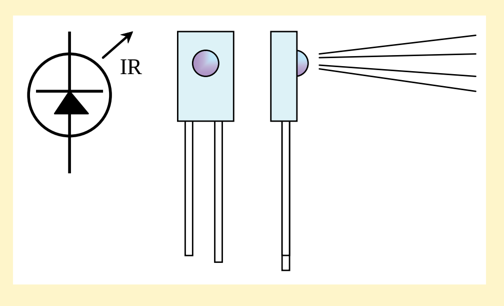
La radiación solar se compone de aproximadamente un 47,3% de luz natural, o radiación visible para los humanos, cuya longitud de onda está comprendida entre 0,42 y 0,70 micrones (que corresponden, respectivamente, al violeta y al rojo); un 45,7% de radiación infrarroja (IR), de longitud de onda comprendida entre 0,7 y 3,0 micrones, llamada radiación infrarroja cercana, y un 7,0% de radiación de longitud de onda menor que la de la parte visible, llamada radiación ultravioleta, o UV, que se clasifica, a su vez, en dura y blanda.[3]

Los diodos infrarrojos, ya mencionados en el capítulo 12, emiten radiación infrarroja de longitud de onda de aproximadamente un micrón; muy cercana a la de la luz visible.

[3] El Sol emite también pequeñas fracciones de otras radiaciones, que no cuentan para la precisión que estamos usando, de sólo tres cifras significativas. Las de menores longitudes de onda son la llamada radiación ultravioleta dura, los rayos X y los rayos gamma; las de mayor longitud, los rayos infrarrojos lejanos, las microondas, y las ondas de radio.

Los diodos infrarrojos se usan en controles remotos, y se los prefiere a los leds de luz visible, por la ventaja de que su radiación no se ve, entonces no incomoda, por ejemplo, en la pantalla de un televisor, cada vez que se cambia de canal, o se ajusta el volumen de sonido.

Antiguamente, se usaban para hacer barreras de radiación, que los intrusos interrumpían con su presencia, y con eso se accionaba una alarma. Su ventaja con respecto a las barreras de luz visible, era que resultaban más difíciles de detectar y de burlar.[4]

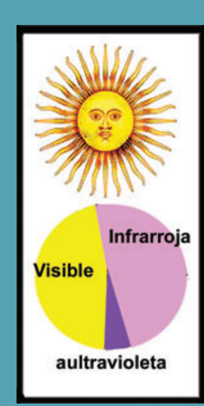



Hay diodos IR de diferentes formas y tamaños. Los más comunes son los cilíndricos. Los hay, también, rectangulares. La figura ilustra un modelo compacto, el OC240, para montar en circuitos impresos de controles remotos pequeños. Mide 5,72 por 4,45 por 1,57 milímetros, sin los alambres de conexión, que se cortan a medida. Tiene una lente frontal que concentra el haz de radiación, para que llegue más lejos sin que se debilite.

La hoja de datos de ese componente informa que la corriente máxima directa es de 50 mA; tiene una tensión máxima inversa de 2 V, con la que circula una corriente inversa de 100 μA; y la potencia máxima es de 100 mW. La longitud de onda promedio de su radiación es de 0,890 micrones (o lo que es lo mismo, 890 nanómetros), y la mitad de la potencia la emite entre 810 y 970 nanómetros de longitud de onda. Siempre de acuerdo con la hoja de datos, la mitad de la radiación se proyecta dentro de un ángulo de 40 grados. Desde el instante en el que se lo alimenta, tarda medio microsegundo en empezar a irradiar; y la mitad de ese tiempo, en dejar de emitir desde que se lo desconecta.[5]

La eficiencia de los diodos IR es semejante a la de los leds, y según los modelos, vale entre 20 y 100 lúmenes por watt.[6]

El diodo infrarrojo se usa en conjunto con otro componente que detecta la ra-




Composición de la radiación solar. Nuestros sentidos perciben separadamente el calor de la luz, aunque con la luz se calienten los cuerpos, y el calor los ilumine. Quizá por eso el Sol de Mayo de nuestra Bandera, en la figura, tiene 16 rayos rectos y 16 curvos. Ese símbolo patrio proviene de la Revolución Francesa, y ésta lo tomó del reinado de Ajenatón, o Amenofis IV, de Egipto.

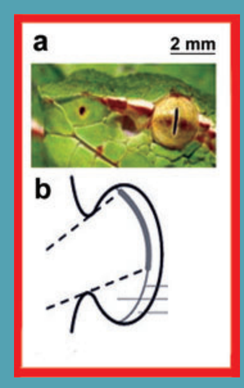


Diodos emisores de rayos infrarrojos.

[4] Actualmente, y para esa aplicación de vigilancia, se prefieren los sensores pasivos de radiación infrarroja, que se mencionan más adelante en este capítulo.

[5] Esos datos son importantes para saber cuál es la máxima frecuencia, o velocidad de transferencia de datos, que se puede manejar con ese diodo IR; no más de 1 MHz en este caso, porque un ciclo de una corriente de esa frecuencia dura una millonésima de segundo; media millonésima para subir, y otra media para bajar; y justo ese tiempo es el mínimo que garantizan.

[6] La eficiencia máxima teórica es de 683 lm/W. Un lumen es la potencia luminosa irradiada por una fuente de una intensidad de una candela (o una bujía), sobre una superficie de un metro cuadrado, ubicada a un metro de distancia. Y una candela es la intensidad luminosa de un objeto de platino de 1/64 de centímetro cuadrado de área, que se encuentre a la temperatura de fusión de ese metal, 2.046 K, ó 1.773 °C. Esa potencia es de 1/683 W, un número incómodo, y nada redondo, tuvo su origen en la facilidad experimental de mantener el platino incandescente a temperatura constante y elevada, sin que se oxide.



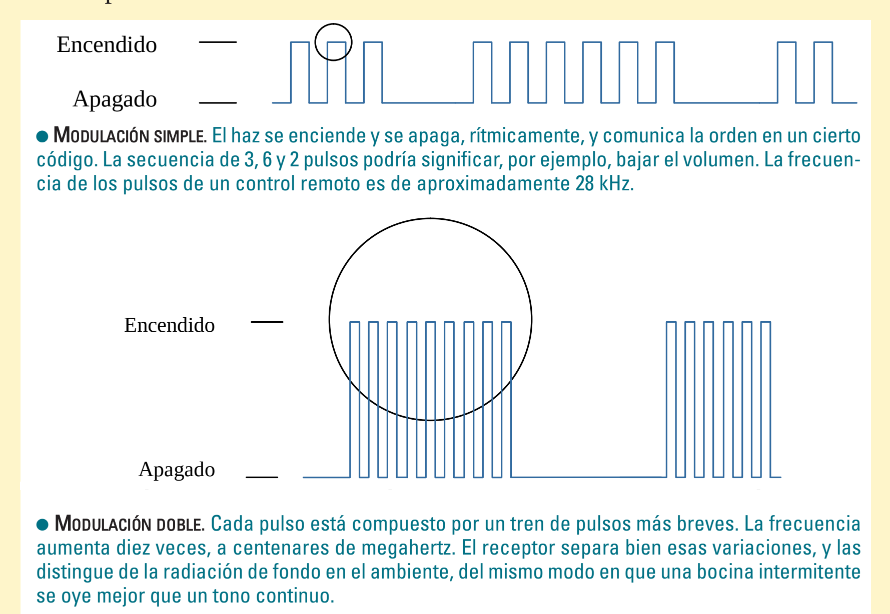

● Los humanos no vemos ondas de más de 700 nm, pero las detectamos, por ejemplo, con la cámara de un celular. Otros animales, como muchas serpientes, perciben (con órganos especiales) ondas de hasta diez micrones. (a) Pitón. (b) Su órgano sensible al infrarrojo lejano, formado por una piel separada de otros tejidos, y muy sensible al calor.



● Las pantallas al rojo de algunos calefactores eléctricos o de gas, o los hogares de leña encendidos, a veces disminuyen la sensibilidad de los detectores de rayos infrarrojos. Los folletos de instrucciones de los controles remotos suelen advertir eso al usuario, para que oriente el receptor hacia un lugar libre de radiaciones extrañas, o de espejos que las reflejen.

diación emitida, por ejemplo, un fototransistor receptor, o una fotorresistencia.

Los diodos de los controles remotos encienden de manera intermitente, para enviar sus señales en código; eso permite ejecutar centenares de órdenes diferentes, según la cantidad de pulsos, la duración de cada uno, y la separación temporal entre dos pulsos consecutivos.




● **Modulación simple.** El haz se enciende y se apaga, rítmicamente, y comunica la orden en un cierto código. La secuencia de 3, 6 y 2 pulsos podría significar, por ejemplo, bajar el volumen. La frecuencia de los pulsos de un control remoto es de aproximadamente 28 kHz.



● **Modulación doble.** Cada pulso está compuesto por un tren de pulsos más breves. La frecuencia aumenta diez veces, a centenares de megahertz. El receptor separa bien esas variaciones, y las distingue de la radiación de fondo en el ambiente, del mismo modo en que una bocina intermitente se oye mejor que un tono continuo.

Cada fabricante de controles remotos establece sus propios códigos, por lo que raramente se puede comandar un aparato con un control de otra marca. Esa falta de universalidad y armonía obedece no sólo a razones de competencia comercial, o al deseo de obligar al cliente a que compre repuestos de la misma marca. A veces hay razones técnicas fundadas para apartarse de normas o prácticas difundidas. Por ejemplo, para disminuir la interferencia de fuentes naturales de rayos infrarrojos, como el Sol y los calefactores, algunos mandos tienen una doble modulación,[7] o entrecortado del haz.

## ● Fototransistores

A lo anticipado en el capítulo anterior, agregamos ahora detalles. Un fototransistor, cuando recibe luz visible o radiación infrarroja, conduce la corriente eléctrica, y cuando permanece en la oscuridad, no conduce. Un ejemplo es el BP 103,

[7] Modular un haz de radiación significa hacer que varíe su amplitud, su frecuencia o su fase. El caso más simple de modulación es hacer guiños: encender y apagar el haz.

de encapsulado TO-18, a la derecha en la figura.

Es sensible a radiaciones de longitudes de onda comprendidas entre 420 y 1.130 nanómetros. Acepta sin daños una tensión de hasta 50 V entre el emisor y el colector, y una corriente de 100 mA entre esos dos únicos electrodos, con la condición de que la potencia máxima no supere los 150 mW (esos datos se obtienen de la hoja de datos publicada por el fabricante, en este caso Siemens).


● Fototransistores, y su símbolo.

Si se desea que el fototransistor responda sólo ante los rayos infrarrojos, y no a los visibles, se le puede poner un filtro, que se vende en los comercios con ese fin. Esto muchas veces carece de importancia, porque los fototransistores reciben señales codificadas en secuencias de pulsos, de modo que es raro que se los pueda interferir. Pero si se los usa en circuitos que detecten haces sin modular, entonces sí conviene ponerles un filtro.

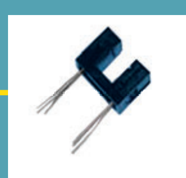

● Con un trozo de disco flexible, se puede improvisar un filtro que impide el paso de la luz visible, y deja pasar los rayos infrarrojos.
***Advertencia:*** *esa poco conocida propiedad del material del disco, es fuente de accidentes. Si se observa un eclipse de Sol a través de ese filtro, se pueden sufrir quemaduras graves de la retina.*

## ● Fotodiodos

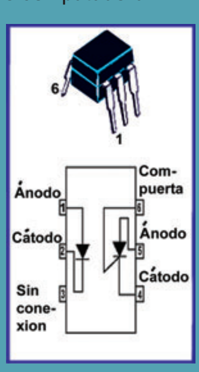
En el capítulo anterior se comentó la propiedad fotovoltaica de los diodos, por la cual generan tensión cuando se los ilumina. Los fotodiodos son componentes fabricados, especialmente, con ese fin, aunque resulten disminuidas sus aptitudes como rectificadores, o como emisores de luz.

Siguen, como ejemplo, datos tomados de la hoja del fotodiodo QSD2030F, fabricado por Fairchild, encapsulado en plástico negro, pero transparente a la radiación de interés. Mide 4,95 mm de diámetro y 7,75 de altura, sin contar los alambres de conexión. Su sensibilidad máxima la presenta para la radiación de longitud de onda de 880 nm, pero es sensible al rango 700 – 1.100 nm. Tiene una capacitancia de un picofarad, y con un resistor de carga de 50 Ω responde a la luz y a la oscuridad en un tiempo menor de cinco nanosegundos. Soporta 50 V de pico inverso, y con 10 V de tensión inversa, conduce menos de 10 µA de corriente. Con 5 V de tensión inversa y cuando se lo ilumina con una radiación de 950 nm de longitud de onda y una densidad de potencia de 0,5 mW/cm$^2$, conduce 25 µA. Detecta la radiación que le llega dentro de un ángulo de 20 grados alrededor de su eje.



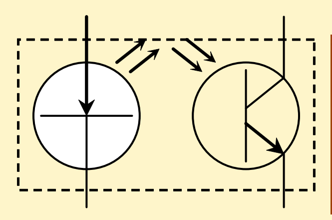


Optoacoplador con ranura, para detectar el paso de objetos que interrumpan el haz luminoso, por ejemplo los dientes de una rueda de ratón de computadora.




Hay diodos controlados que se disparan, indistintamente, con su compuerta, o mediante una señal luminosa provista por un led. Se llaman optoacopladores SCR, u optoSCR. En la figura, el 4N39 de Fairchild, de menos de 1 cm, para 200 V y 300 mA.

# Optoacopladores





El optoacoplador es un conjunto de un diodo emisor de luz, o led. y de un fototransistor (o bien un fotodiodo, o un fotorresistor), los dos encapsulados juntos, y a salvo de la luz exterior. Cuando se hace circular corriente por el led, emite luz, que recibe el fototransistor; entonces éste conduce la corriente eléctrica.

¿Qué utilidad tiene ese componente? ¿Por qué enviar una señal eléctrica a un led, hacer que la luz que emite excite un fototransistor para que conduzca, y obtener de éste, en suma, una nueva señal eléctrica? ¿No podríamos utilizar, en ese caso, directamente, la señal eléctrica de entrada, amplificada si fuere necesario?

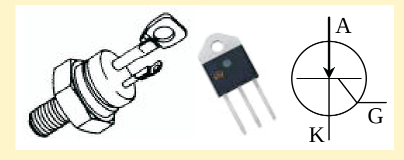
La respuesta es que hay casos en que conviene separar o independizar dos señales eléctricas, para proteger el segundo circuito de tensiones anormales excesivas, o ruidos eléctricos, que puedan provenir del primero.

Entre la gran variedad de optoacopladores que se ofrecen en el comercio, entre ellos algunos múltiples de varias entradas, o de varias salidas, o bien, independientes, pero puestos en la misma cápsula para ahorro de sitio, transcribimos algunos datos de la hoja del ISP81X.

Su led de entrada admite una corriente directa de 50 mA, una tensión inversa de 6 V, y disipa hasta 70 mW. Su transistor de salida admite una tensión inversa de hasta 35 V, una directa de hasta 6 V, y una corriente directa de 50 mA, con una potencia de disipación máxima de 150 mW.

Amplifica la corriente de entrada en un factor 6. la resistencia de aislación entre la entrada y la salida es de más de 50 GΩ, y soporta, entre una y otra, una tensión de 5.300 volt eficaces de tensión alterna. Tiene un tiempo típico de respuesta de 4 µs, y el máximo garantizado es de 18 µs.

# Diodos controlados

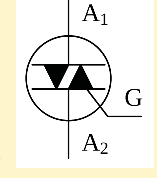



Los diodos controlados, o tiristores, se conocen también como SCR, iniciales de *silicon controlled rectifiers*, rectificadores controlados de silicio.

Un diodo controlado se comporta de manera semejante a la de un diodo común, pero sólo conduce entre sus electrodos principales, el ánodo *A* y el cátodo *K*, cuando recibe una señal por un electrodo de control, la compuerta *G*.

Se distingue de un transistor en tres hechos principales. Uno es que no conduce de manera proporcional a la corriente de control, sino que lo hace plenamente, o bien no conduce en absoluto, según que la señal supere o no el valor umbral de disparo. Otra característica distintiva es que, una vez que un diodo controlado comenzó a conducir, la conducción prosigue mientras la corriente no disminuya por debajo de un cierto valor de sostenimiento, aunque cese la señal.[8] Más aún: un diodo controlado puede seguir conduciendo, aunque la tensión directa que se le aplique sea nula, si hay elementos inductivos en serie, por ejemplo la bobina de un relé, o la de un motor. Y un tercer hecho que diferencia el SCR del transistor es que también se dispara y conduce cuando se aplica bastante tensión directa; y sigue conduciendo hasta que, por un cambio en las condiciones externas, la corriente disminuya por debajo del límite de sostenimiento. Por estas razones, en vez de hablar de la conducción de un tiristor, se prefiere decir que se disparan, o se ceban, ya que la tensión directa pasa, bruscamente, del valor de la tensión de la fuente, cuando no conduce, a un valor pequeño, del orden de un volt, cuando se vuelve conductor.

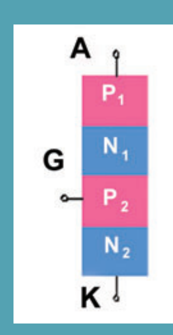
## Triacs




Un triac (triodo para corriente alterna) tiene el mismo aspecto exterior que un SCR, pero controla la corriente en los dos sentidos.

Los triacs se usan en atenuadores de luces, o *dimmers*, que se comandan con una perilla desde cero al máximo, en hornos eléctricos, y en otras aplicaciones en las que se desee una regulación continua, y no de a saltos, de todo o nada, como la que proporciona un termostato consistente en un contacto que se abre y se cierra.

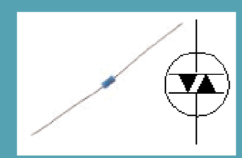
Si comparamos los tamaños de un transistor y de un triac (los dos para la misma tensión y corriente) el triac suele ser bastante más pequeño, porque como conduce o aísla, sin términos medios, entonces la potencia que disipa es pequeña.[9]



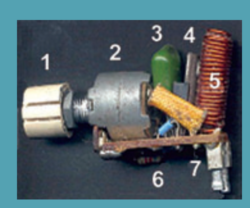

Estructura de un diodo controlado de polaridad P. Los de la opuesta, tienen la compuerta conectada al cristal semiconductor N intermedio.

[8] En ese aspecto, el SCR se comporta como un relé autoalimentado, tratado en el capítulo 8.

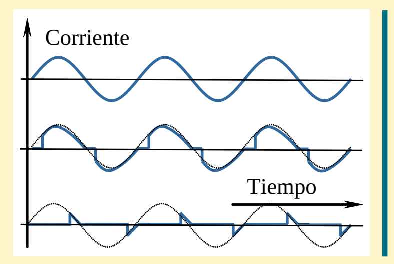
[9] La potencia se calcula como el producto de la tensión por la corriente. Si la corriente que atraviesa el triac es elevada, pero la tensión directa de conducción es pequeña, entonces la potencia resulta moderada. En cambio, la tensión directa de un transistor entre el emisor y el colector puede alcanzar valores grandes, si la corriente de base adopta valores intermedios entre cero y la máxima de trabajo.



Para facilitar el disparo de un triac, conviene poner, en serie con su compuerta, un *diodo de disparo*. Ese elemento, también llamado diac (diodo de corriente alterna), y *diodo de cuatro capas*, se vuelve súbitamente conductor cuando la tensión supera un umbral, y eso genera un pulso de corriente. Un diac se puede pensar como un triac sin compuerta. En la figura, un diac DB3, de tensión de disparo de 28 V admite pulsos de hasta 1 A.




Atenuador de luz visto por dentro. El conjunto se monta en el mismo lugar que una llave común de luz. 1: perilla; 2: resistor variable. 3: capacitor. 4: triac. 5: inductor. 6: diodo de disparo. 7: contactos.
Sin el inductor, el aparato interferiría otros, o la luz destellaría por influencias externas, cada vez que arranque un motor.

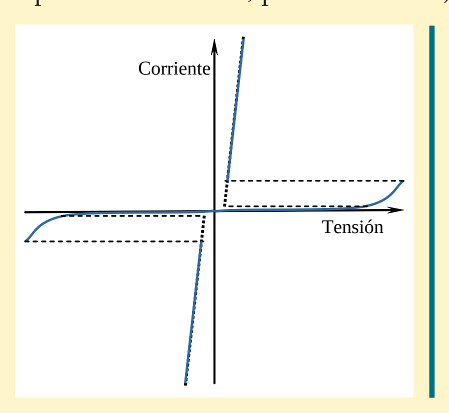



**Regulación proporcional de un triac. Arriba, conduce durante todo el período de la corriente alterna. En el medio, conducción durante un tiempo menor que el total. Abajo, conducción durante una pequeña parte de cada período.**

A este tipo de control de la corriente, que consiste en permitir su paso durante parte del período de la corriente alterna, e impedirlo en el resto del tiempo, se suele llamar *control de ángulo*. El ángulo, en este caso, es el tiempo, y se le da ese nombre por similitud con el argumento de la función seno, o coseno, en trigonometría. En nuestro país, donde usamos 50 Hz, un ángulo de 360 grados equivale a un tiempo de 20 milisegundos, lo que dura un período.

Una ventaja de esta clase de regulación, en comparación con la de un sistema de todo o nada, es que se evita el desgaste de los contactos del termostato, o los del relé que comanda, si la corriente es elevada. El triac, lo mismo que los diodos controlados y los transistores, interrumpen la corriente sin hacer chispas. Y una desventaja, es que las repetidas conexiones bruscas tienen a veces efectos inductivos[10] que dan lugar a la emisión de ondas de radio que interfieren otros equipos. Por esa razón, los buenos atenuadores de luz o controles de temperatura basados en triacs, tienen elementos que filtran esas interferencias; por ejemplo varistores, varicaps, capacitores o inductores.

Con un costo todavía elevado, ya hay triacs que manejan decenas de miles de volt, y varios cientos de ampere, apropiados para funciones de distribución de energía eléctrica. Se los desarrolló para reemplazar triodos de mercurio (se tiende a prohibir este metal, por su toxicidad).




**Curva característica de un triac (el dibujo no está en escala). La corriente directa es muy pequeña hasta que se alcanza una tensión elevada de disparo, y el triac conduce. Pero lo hace también con tensiones directas menores, si recibe un pulso en la compuerta.**

[10] Recordemos que la fuerza electromotriz inducida es proporcional al cociente entre la variación de la corriente, y el tiempo en el que ocurre esa variación.

## Inductores

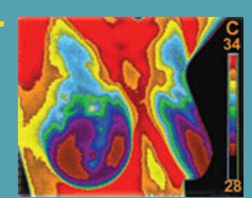
Los inductores[11] o bobinas más comunes, según su aplicación, pueden tener núcleo de aire, de hierro o de ferrita. Es posible conseguir núcleos sueltos, y armar uno mismo los inductores, si son de pocas vueltas. Su inductancia se mide en henry (H). Cuando se usa un inductor para bloquear el paso de interferencias de alta frecuencia, se los llama estranguladores; pero casi nadie habla así. En este ámbito, y en nuestro país, se usa el nombre en inglés, *choke*, aunque pronunciado como se lee en nuestra fonética. Algunos lo escriben *choque*, y no sería del todo incorrecto, si imaginamos que la radiofrecuencia choca contra ese filtro; pero no es ése el sentido original de la palabra.



*Chokes* de alta frecuencia. Los cuatro o cinco cables de los conectores para puertos de computadora, se enrollan unas pocas vueltas a través de las ventanas de núcleos de ferrita. La autoinducción filtra las corrientes de alta frecuencia.

## Detectores pasivos de radiación infrarroja

Los sensores infrarrojos pasivos (PIR, por sus iniciales en inglés) revolucionaron la detección del movimiento de personas, que hasta 1970 ó 1975 se hacía con complejos sistemas activos, que consistían en la emisión de una radiación (por ejemplo un haz de luz, una onda de radio o un sonido), y la detección de su rebote en el cuerpo. Los detectores pasivos, en cambio, no irradian nada, y responden a la radiación infrarroja que emite el cuerpo, de longitud de onda de menos de nueve micrones, algo menor que la de la radiación de fondo del ambiente.[12] Se los fabrica con láminas de nitrito de galio, nitrato de cesio, y fluoruros orgánicos, entre otras sustancias. Antes de su invención, las imágenes infrarrojas se debían obtener con sensores sumergidos en nitrógeno líquido, para que no detectasen su propia radiación.




Es triste saber que parte de los motivos que impulsaron la tecnología de los sensores infrarrojos pasivos responde a aplicaciones bélicas y de vigilancia contra el delito. Pero consuela saber que, también, hay usos pacíficos, por ejemplo ayudar al diagnóstico de algunos tipos de cáncer, por las diferencias de la temperatura de la piel entre una zona y otra; apagar automáticamente una luz cuando pasa mucho tiempo sin que nadie se mueva en un ambiente, y abrir una puerta cuando alguien se acerca. En la imagen, un examen de mamas.

El componente sensible de un sensor pasivo es generalmente un conjunto de dos cristales conectados en serie y con la polaridad opuesta, de modo que sólo detecten *diferencias* de la radiación que les llega. Están cubiertos por una lente múltiple (transparente a la radiación IR) que proyecta imágenes infrarrojas sobre las dos partes del sensor. Cuando la persona se mueve, desequilibra el balance, y aparece



[11] Muchos llaman inductancias a los inductores, y resistencias a los resistores. Es un uso admitido, pero aquí preferimos, por mayor claridad, distinguir el nombre del componente, de la magnitud que lo caracteriza.

[12] Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética, excepto los que se encuentran a cero grado de temperatura absoluta. La longitud de onda de esa radiación depende de la temperatura a la que se encuentre el objeto, y a las características de su superficie. Por ejemplo, una brasa de carbón, a 700 °C, emite luz roja o anaranjada; el filamento de una lámpara, luz amarilla, de longitud de onda menor. Ciertas estrellas, muy calientes, emiten rayos X. Un cuerpo a veinte grados emite una radiación de unos diez micrones de longitud de onda.

una señal eléctrica que se amplifica. Si uno se mueve muy lentamente, el aparato no lo detecta, porque si lo hiciese, debería actuar, también, con las variaciones térmicas originadas en el movimiento relativo del Sol. En la figura anterior, el sensor PIR325.




- Zumbador WST-16, para soldar en circuito impreso, de 14 mm de diámetro y 16 de alto. Cuando se lo alimenta con 12 Vcc, la corriente es de 30 mA, con un nivel sonoro de 85 decibeles a un metro de distancia. Resuena a una frecuencia de 2.300 Hz. El papel adherido a la abertura lo protege de insectos y polvo durante el almacenamiento.
Se basa en un disco cerámico *piezoeléctrico*, esto es, que genera electricidad cuando se lo deforma, y se deforma cuando se le aplica electricidad.

## Módulos programables

Hay componentes que presentan un comportamiento único ante idénticas condiciones, por ejemplo, un resistor, un transistor, un capacitor o un diodo rectificador o emisor. Otros, en cambio, como un diac, o un triac, presentan un estado que, además de depender de las condiciones externas, es también una función de la historia previa del componente. Si un triac estaba conduciendo por haber recibido un pulso en su compuerta, lo seguirá haciendo; pero dejará de conducir cuando se lo desconecte por un momento. En ese sentido, es un dispositivo con *memoria*, posiblemente el más sencillo que ofrece la electrónica.



Los circuitos integrados programables (PIC) consisten en conjuntos muy grandes de semiconductores capaces de almacenar información, que en algunos casos permanece aunque se desconecte la alimentación. Tienen contactos para alimentarlos eléctricamente, y oros para el ingreso y salida de datos. Algunos detalles de su funcionamiento se verán en el capítulo 17 de introducción a las técnicas digitales. Los PIC más complejos son hoy el órgano central de las computadoras; otros más sencillos cumplen funciones menos amplias en relojes, controladores de temperatura con memoria, manejo de brazos robóticos, control de inyección de combustible en coches, sintonizadores de radio y TV, etcétera. En la figura, dos circuitos PIC 16F84, de 40 patas.

Aunque para programar uno de esos circuitos, usualmente, se emplean otros circuitos programadores, con fines de aprendizaje o experimentales es posible programarlo con sólo accionar interruptores en la secuencia correcta.



- Fotorresistor, o LDR (de *light dependant resistor*). Los dos peines metálicos entrelazados no se tocan, y entre ellos se aloja la sustancia sensible a la luz, generalmente sulfuro de cadmio. A oscuras tiene más de 100 MΩ de resistencia; a plena luz, algunos centenares de ohm.

## Propuestas de estudio

**14.1.** ¿Es posible reemplazar un triac por dos SCR? Justificar.
**14.2.** ¿Qué función cumple el pequeño escalón de arriba a la izquierda, en la imagen de la cápsula del optoacoplador de la página 172?
**14.3.** ¿Qué ocurre si a un sensor pasivo infrarrojo se le quita el plástico blanco

curvo que lo cubre? Si se puede hacer sin causar inconvenientes, conviene experimentarlo.

**14.4.** De acuerdo al código descrito en este capítulo, ¿qué colores corresponden a un resistor de 1 MΩ?

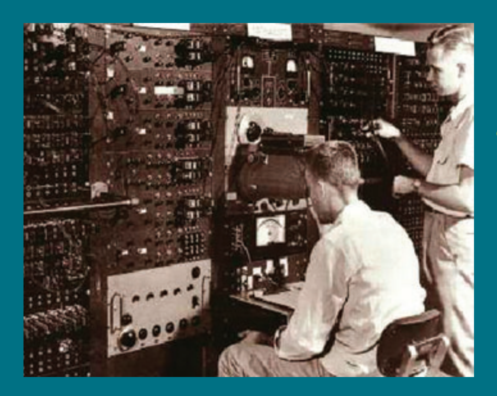
**14.5.** Una persona puso un atenuador de triac en una lámpara alimentada con 12 Vca, y le funcionó perfectamente bien. ¿Funcionará también con una batería de 12 Vcc? Justificar.

## Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en la Red con las palabras componentes electrónicos, G.M. Electrónica (un comercio de Buenos Aires, con gran variedad de productos, y que publica los datos).
- Este sitio, muy conocido en el ámbito de los aficionados a la electrónica, ofrece muchos circuitos sencillos, con aplicaciones prácticas y experimentales: *http://www.pablin.com.ar*
- Alberto Picerno, *Curso de electrónica completa*: *http://electronicacompleta.com.*

# Capítulo 15

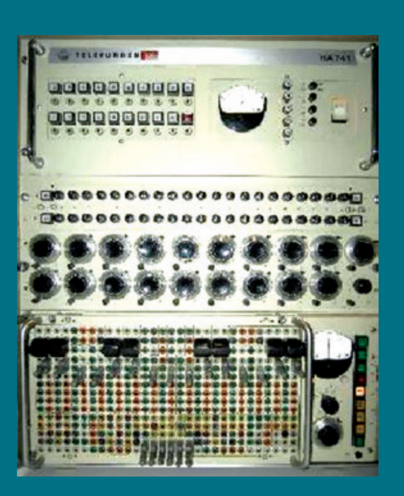
# Amplificadores operacionales

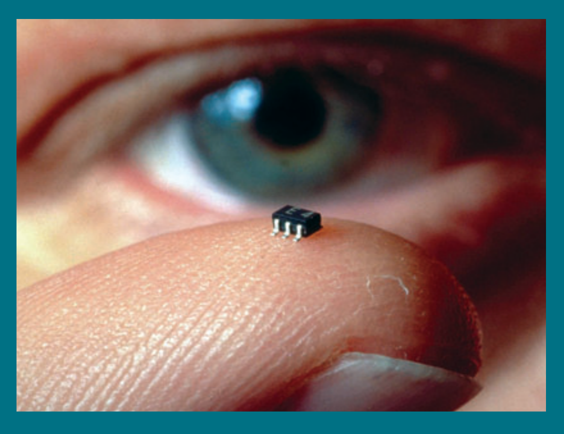


Las computadoras de 1950 eran poco útiles para el cálculo, porque eran *analógicas*, y no digitales. Para resolver un problema mecánico, se armaba un circuito eléctrico de igual comportamiento matemático, y los valores de las fuerzas, o distancias, se sabían por la medición de tensiones, o corrientes.
Las operaciones analógicas las hacían unos circuitos llamados *amplificadores operacionales*. En la foto, una computadora de esa época, que manejaba las estaciones compresoras de gas de la Southern Gas Association, en Texas, USA.



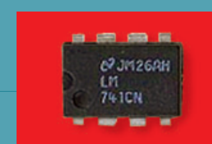
Estudio de la amortiguación de un coche con una computadora analógica Telefunken RA 741, de 1956. Tenía 23 amplificadores operacionales: 8 integradores, 11 sumadores y 4 inversores; todos de triodos de vacío.



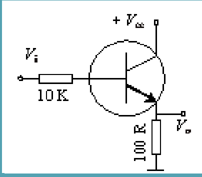



Actualmente las computadoras son digitales: operan con números, y no con analogías eléctricas; y los amplificadores operacionales tienen otros usos. En la foto, el LMV321 de un teléfono celular.

# Amplificadores operacionales




● Amplificador operacional LM741CN, de 4 a 12 V, 500 mW; entrada hasta 0,4 V; ganancia 15.000, encapsulado DIP (dual in-line package, encapsulado dual en línea), de aproximadamente un centímetro de largo.




● Seguidor emisórico. La tensión de entrada, $V_i$, es prácticamente igual a la de salida, $V_o$. Pero, a la salida hay más corriente disponible. Cuando entra un microampere a la base del transistor, la caída de tensión en el resistor de 10 kΩ es de 10 mV. Si el factor beta del transistor vale 100, para que la tensión de salida sufra la misma merma, se puede extraer una corriente cien veces mayor, 10 mA.

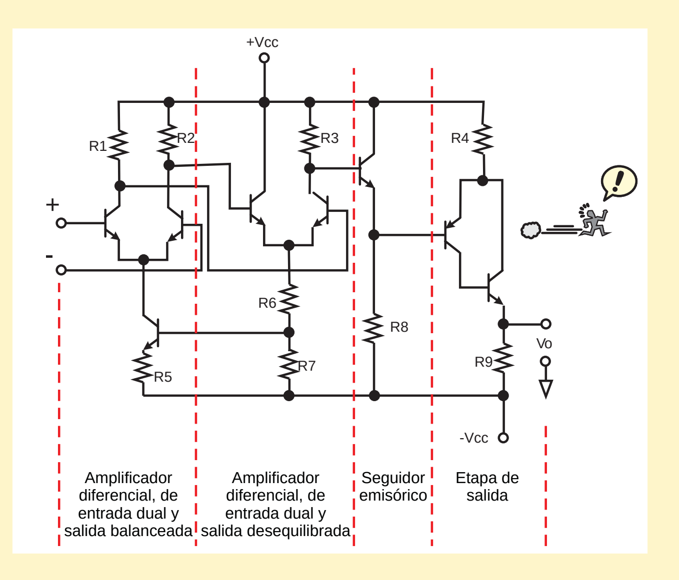
Este circuito, que amplifica corriente pero no tensión, es similar al antiguo *seguidor catódico*, de triodos de vacío.

En los capítulos 11 y 13 se describieron algunos amplificadores de válvulas de vacío y de transistores, aplicados a diversos fines, por ejemplo el de convertir en sonido la señal de un micrófono, o el de encender automáticamente una lámpara cuando la luz del día deja de iluminar un fotorresistor. Esas funciones, y muchas más, se pueden hacer también con los amplificadores operacionales disponibles hoy en la industria.

Los amplificadores operacionales se inventaron para las ya obsoletas computadoras analógicas, pero su universalidad y facilidad de adaptación los hacen apropiados para cumplir muy diversas funciones, con sólo agregarles uno o dos resistores, o capacitores, según la aplicación.

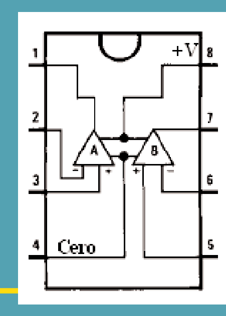
Un amplificador operacional, abreviadamente AO, OA u *op-amp*, es un amplificador *diferencial*; esto es, amplifica la *diferencia*, o resta, entre dos tensiones eléctricas de entrada.

Sin ocuparnos, por ahora, de los detalles – que varían con los fabricantes y modelos – podemos ver en la figura, la composición interna de un amplificador operacional. Nótese que los símbolos de los transistores carecen de círculo, porque comparten el encapsulado.



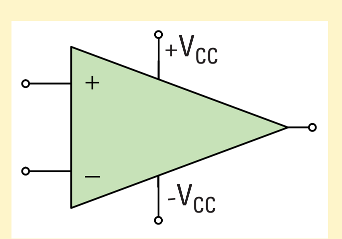
Entre los puntos $+V_{CC}$ y $-V_{CC}$ se aplican, por ejemplo, +12 V y –12 V con respecto a tierra. A la izquierda, + y – son los contactos de entrada. A la derecha, $V_0$ es la tensión de salida con respecto a tierra.

El circuito incluye un amplificador de entrada, uno adicional inmediato, un amplificador seguidor emisórico, que permite obtener más corriente, y un cuarto amplificador a la salida. Esa división en etapas permite un mejor control, que el que se obtendría con sólo dos transistores.




- Hay amplificadores operacionales que se alimentan con una sola tensión, y no con dos simétricas. En la figura, el componente LM358N, con dos op-amps en la misma cápsula. Tiene la ventaja de que se puede usar una sola batería como fuente, conectada entre +V y cero. Pero, naturalmente, la tensión de salida está siempre comprendida entre cero y +V.

## Símbolo del amplificador operacional




Es cómodo representar un amplificador operacional con un triángulo y cinco contactos. Dos de ellos son para la alimentación simétrica de tensión continua, por ejemplo +12 V y –12 V con respecto a tierra, o con respecto a un punto de referencia del circuito, aunque no esté a tierra. Los dos contactos de la izquierda son los de entrada; y el de la derecha, el de salida.

En vez de $-V_{CC}$ y $+V_{CC}$ se suele indicar, con más generalidad y sin el signo, $V_{CC}$ y $V_{EE}$, que se interpretan como la tensión en los colectores y la tensión en los emisores, que son positiva y negativa, respectivamente, cuando los transistores del amplificador operacional tienen polaridad N, la más común.

Las entradas + y – se llaman, respectivamente, *entrada no inversora*, y *entrada inversora*. Los signos + y – son los nombres de las entradas, y no la polaridad verdadera de las tensiones que se les apliquen.

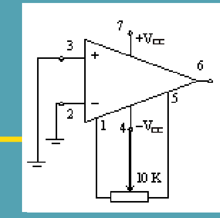
## Funcionamiento ideal

Las entradas tienen una resistencia muy elevada, idealmente infinita y, cuando se les aplica una tensión, no circula corriente, o ésta es insignificante.

Cuando la entrada + está a un potencial eléctrico mayor que el de la entrada, esto es, cuando + es positiva con respecto a, el potencial de salida es de +12 V, o el valor positivo de la alimentación, si fuera diferente de 12 V.

Cuando la entrada + se encuentra a un potencial eléctrico menor que el de la entrada –, esto es, cuando + es negativa con respecto a –, el potencial de salida es de –12 V, o el valor negativo de la alimentación, si fuera diferente de 12 V.

Para que la salida sea siempre extrema positiva, o extrema negativa, no importa –idealmente– cuán pequeña sea la diferencia entre los potenciales de entrada. Pero




- Ajuste de cero de un amplificador operacional. Con las dos entradas a tierra, se ajusta el resistor variable, o potenciómetro, hasta que la tensión de salida sea nula. Después se eliminan las conexiones a tierra, y se usan normalmente las entradas.

en la práctica, la sensibilidad del circuito es limitada y, por eso, no responde a diferencias de potencial muy pequeñas.

Los amplificadores operacionales más comunes detectan diferencias de potencial de algunas millonésimas de volt.

Ya se ha dicho qué sucede cuando entre los contactos de entrada hay una tensión positiva o negativa. ¿Y si la diferencia de potencial entre + y – fuera nula? ¿Qué ocurre, en ese caso, con la salida? Lo que sucede en tal caso es que la tensión de salida mantiene el valor que tenía (intermedio entre extremos) cuando se dio la condición de igualdad de los potenciales de entrada.

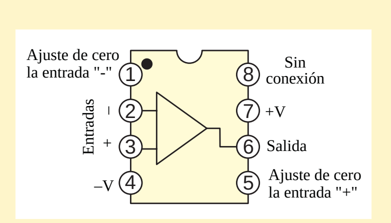
Tal como se ha descrito el funcionamiento ideal de un op-amp, su ganancia es infinita, puesto que alcanza con una diferencia arbitrariamente pequeña entre los potenciales de entrada, para que la tensión de salida salte de $-V_{CC}$ a $+V_{CC}$, o al revés. Pero en la práctica la ganancia no supera en mucho un factor de cien mil.[1]

Además de los cinco electrodos principales (alimentación positiva, alimentación negativa, entrada no inversora, entrada inversora y salida), muchos op-amp tienen dos contactos adicionales para el ajuste de cero, más conocido por su nombre en inglés, *null offset*.[2] Ese ajuste compensa pequeñas asimetrías del circuito, que hacen que haya una pequeña tensión de salida en los casos en que, en teoría, esa tensión debería ser nula.

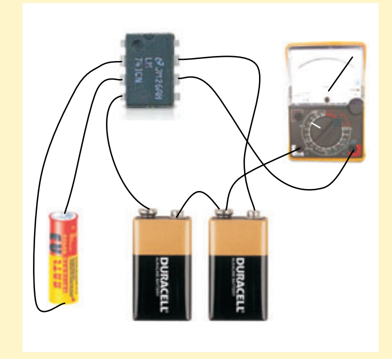



Antiguo amplificador operacional de válvulas de vacío, el K2-W, de 1953. El primer aparato de ese tipo se patentó 1941 como amplificador sumador. Tenía una ganancia de 95 decibeles (un factor de tres mil millones), medía unos diez centímetros de altura, y funcionaba con 360 V en placas.

## El ejemplo más sencillo: un comparador




**Circuito elemental de prueba (los tamaños no están en escala).**




Para probar la función más elemental de un op-amp, se puede usar un LM741CN, dos baterías de 9 V para alimentarlo, una pila de 1,5 V para probar

[1] En el caso de los amplificadores (o de sus contrarios, los atenuadores), en vez de hablar del factor de amplificación (o de atenuación), se prefiere, por simplicidad, usar su logaritmo decimal. El logaritmo decimal de 100.000 vale 5, entonces la ganancia del amplificador es de 5 bel, o lo que es lo mismo, de 50 decibeles. (5 B = 50 dB)

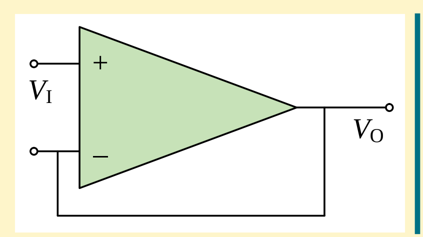
[2] Literalmente, corrimiento de cero.

la entrada, y un voltímetro. Cuando se conecta la pila con la polaridad indicada, el voltímetro marca +9 V. Si se invierte la conexión de la pila, la tensión que indica el voltímetro pasa a ser de –9 V. Si se quita la pila y se dejan sueltos los cables conectados a las patas 2 y 3 del amplificador, se verá cómo la aguja del instrumento tiembla. Eso sucede porque los cables sueltos captan la tensión alterna del ambiente. En los semiciclos negativos, el operacional se vuelca a +9 V de salida, y a –9V en los semiciclos negativos.

La indicación del voltímetro, con esa conexión, será siempre o bien +9 V, o bien –9 V, según que la pata 3 sea positiva o negativa con respecto a la pata 2.

Es difícil lograr que el voltímetro indique tensiones intermedias, o cero. Es suficiente con que haya veinte o treinta microvolt de diferencia de potencial entre los contactos de entrada, para que se obtenga una salida diferente de cero.

## Seguidor



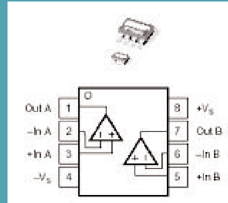

- **En el circuito *seguidor*, la tensión de salida, $V_O$ es, prácticamente, igual a la de entrada, $V_I$. No hay amplificación de tensión, pero sí la hay de corriente (los subíndices I y O para la entrada y la salida provienen del inglés, in y out).**

Para comprender cómo funciona[3] el circuito seguidor, imaginemos que la tensión de salida, $V_O$, crece por alguna razón, por encima de $V_I$. Eso significa que la entrada inversora (–) es positiva con respecto a la entrada no inversora (+). En consecuencia, y de acuerdo con el funcionamiento básico del amplificador operacional, la tensión de salida tiene que adoptar el valor $-V_{CC}$, con lo cual deja de estar, obviamente, por encima de la tensión de entrada, como acabamos de suponer.

A la inversa, imaginemos que la tensión de salida cae por debajo de la de entrada. Eso significa que la entrada inversora (–) es negativa con respecto a la otra entrada (+). En consecuencia, la tensión de salida tiene que adoptar el valor +V, con lo cual deja de estar por debajo de la tensión de entrada, como dijimos.

La única forma de que los hechos no manifiesten ninguna de las dos contradicciones extremas mencionadas, es que la tensión de salida sea igual a la de entrada. En la práctica, hay una pequeña diferencia de veinte o treinta microvolt.

[3] En este desarrollo, para mayor claridad, y salvo que vengan muy al caso, omitimos representar la alimentación, el ajuste de cero, y la conexión de tierra.




- Los amplificadores operacionales de realimentación de corriente (CFB, *current feedback*) son similares a los ordinarios de realimentación de tensión, pero su resistencia de entrada es idealmente nula, en vez de ser idealmente infinita. Tienen ventajas en el rechazo del ruido en aplicaciones de alta frecuencia. En la imagen, el dual OPA2683, de hasta 110 mA de corriente de entrada.



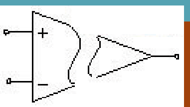

● **Henry Le Châtelier y Heinrick Lenz.** El principio de Le Châtelier, que establece que en una reacción química las concentraciones cambian de modo que se reduzca la velocidad de la reacción: y la ley de Lenz, que dice que la fuerza electromotriz inducida se opone a la variación de la corriente que la produce, son dos ejemplos de realimentación negativa.

## Realimentación positiva y negativa

Hay fenómenos en los que los efectos refuerzan las causas. Por ejemplo, alguien aprende un idioma, con eso puede empezar a leer libros de estudio escritos en la nueva lengua, con lo que aprende más; puede leer entonces obras más avanzadas, y así cada vez, y sin límite. Es un caso de *realimentación positiva*, donde la dificultad mayor es la de arranque.

En otros procesos los efectos se oponen a las causas. Por ejemplo, alguien aprieta el acelerador del coche; aumenta la velocidad del vehículo, y la persona queda algo atrasada con respecto al coche; entonces pisa menos fuertemente el acelerador y, por eso, la velocidad no aumenta tanto como si manejara el coche por control remoto, desde un lugar fijo. Es un caso de *realimentación negativa*.

En las aplicaciones útiles de los amplificadores operacionales se usa la realimentación negativa, porque la positiva forzaría el componente hacia una salida plena, positiva o negativa. Nótese, en la figura anterior y en las que siguen, que la salida se conecta siempre a la entrada inversora, sea en forma directa como en el seguidor, o bien indirectamente, a través de resistores, u otros elementos.

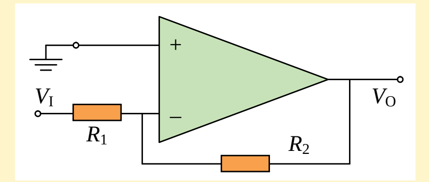





● El símbolo representa un amplificador operacional de *aislamiento*. Se caracteriza por tener potenciales de referencia independientes en las entradas y la salida. Eso es útil para independizar las fuentes de alimentación eléctrica de los circuitos, por ejemplo en los monitores cardíacos de los pacientes. Un ejemplo de ese tipo de op-amp es el 3.656AG, que aísla hasta 8.000 V entre la entrada y la salida. El acoplamiento entre la entrada y la salida es inductivo, a través de transformadores. Mide 25×25×7 mm.

## Amplificador inversor

En esta conexión, la salida está invertida con respecto a la entrada, y amplificada en un factor igual al cociente entre las resistencias de entrada y de realimentación, $R_1$ y $R_2$, respectivamente.



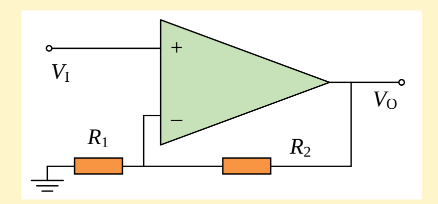

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} V_i \qquad (1)$$

Para comprender el funcionamiento, es útil recordar que para que el op-amp entregue una tensión que no sea extrema, la diferencia de potencial entre sus entradas tiene que ser nula. Si tomamos el potencial de tierra como cero de referencia, las entradas + y – están, entonces, a potencial nulo. La tensión sobre $R_2$ vale $V_0$, y la tensión sobre $R_1$ vale $V_I$. Como la entrada no toma corriente, la intensidad que circula por $R_2$ hacia la izquierda, tiene que valer lo mismo que la que pasa por $R_1$ hacia el mismo lado.

La corriente se calcula como el cociente entre la tensión y la resistencia. En-

tonces, $(V_0 - 0) / R_2$ vale lo mismo que $(0 - V_1) / R_1$, de lo que se deduce la fórmula (1).

## Amplificador sin inversión




$$V_0 = \frac{R_2 + R_1}{R_1} V_i \qquad (2)$$

Con igual razonamiento, partimos del hecho de que las dos entradas están al mismo potencial y que, ninguna de las dos, toma corriente. Entonces, los resistores están en serie; la corriente que circula por ambos es la misma, y su valor es $I = V_0 / (R_1 + R_2)$.

La tensión se calcula como el producto de la corriente por la resistencia; entonces, la tensión sobre $R_1$ vale $I.\ R_1$, o bien $V_0.\ R_1 / (R_1 + R_2)$. Y como esta tensión tiene que ser igual a la de la otra entrada, $V_I$, se deduce la fórmula (2) que figura a la derecha del circuito.

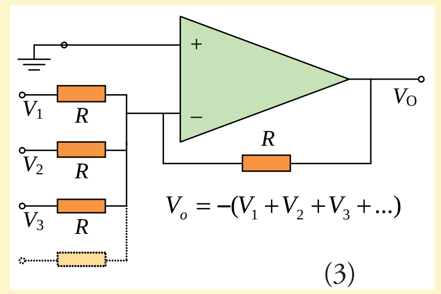
Ahora no hay inversión de polaridad, porque la señal de entrada se aplica a la entrada +, que no es inversora. El punto de unión entre los dos resistores se encuentra a un potencial intermedio entre el de salida, y el potencial cero de tierra.

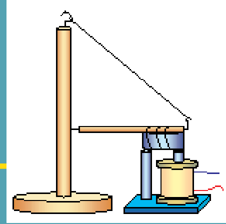
Siguen más ejemplos de uso de amplificadores operacionales.

## Sumador con inversión

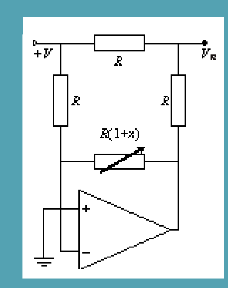
La tensión de salida es igual a la suma de las de entrada, pero con una inversión de la polaridad.

Un razonamiento posible para comprender el circuito, es considerar que los potenciales en + y en – son nulos, y las entradas no toman corriente. Entonces, la corriente que circula hacia la izquierda por el resistor de realimentación negativa ($I = V_0 / R$) vale lo mismo que la suma de las corrientes que circulan por los otros resistores R hacia el mismo lado. Y cada una de esas corrientes valen $(0 - V_1) / R$, $(0 - V_2) / R$; $(0 - V_3) / R$, etcétera; de lo que se deduce la fórmula (3) que está junto al circuito.

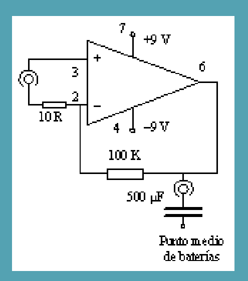


La gran multiplicación que brinda un amplificador operacional tiene aplicaciones tan variadas, que algunas se descubrieron por azar. Si se le conecta a la entrada una bobina en cuya cercanía se desplace un imán suspendido, el dispositivo detecta vibraciones y movimientos, entre ellos los sísmicos.

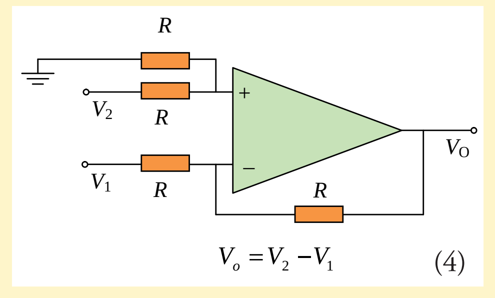



Uso de un op-amp para obtener una tesión directamente proporcional a la variación de una resistencia que forma parte de un circuito puente (por ejemplo, un fotorresistor). La tensión de salida, $V_S$, vale $-V.x/2$.




- Sencillo amplificador de sonido, o de cualquier otra señal. Usa un op-amp LM741CN, dos baterías de 9 V, dos resistores y un capacitor que impide el paso de la corriente continua. Funciona con dos audífonos, uno de los cuales hace de micrófono. Se ha usado para detectar, con cables sumergidos, señales emitidas por peces eléctricos (carece de ajuste de volumen, que se le puede hacer con un resistor de 100 kΩ variable).

## Restador




La tensión de salida del circuito, $V_0$, es igual a la diferencia entre las tensiones de entrada, $V_2 - V_1$. Para comprender el porqué sucede eso, consideremos que las entradas no toman corriente, entonces, los dos resistores de arriba están en serie, y el potencial de la entrada + es la mitad[4] de $V_2$. Ese potencial tiene que ser igual al de la otra entrada (de otro modo, el operacional se volcaría a una tensión extrema). Entonces, el potencial de la entrada inversora vale, también, $V_2$ /2. Pero además, y si miramos la serie de abajo, ese potencial vale $(V_0 - V_1).R / 2R + V_1$; esto es, la diferencia de potencial entre los extremos de la serie inferior, dividida por la resistencia de esa serie (hasta ahí tenemos la corriente que circula por ella), multiplicada por la resistencia del resistor de abajo a la izquierda (hasta ahí hemos obtenido la tensión en ese resistor), más la tensión $V_1$. De la igualdad $V_2 / 2 = (V_0 - V_1).R / 2R + V_1$, se deduce la fórmula (4) de la resta que acompaña ese circuito.

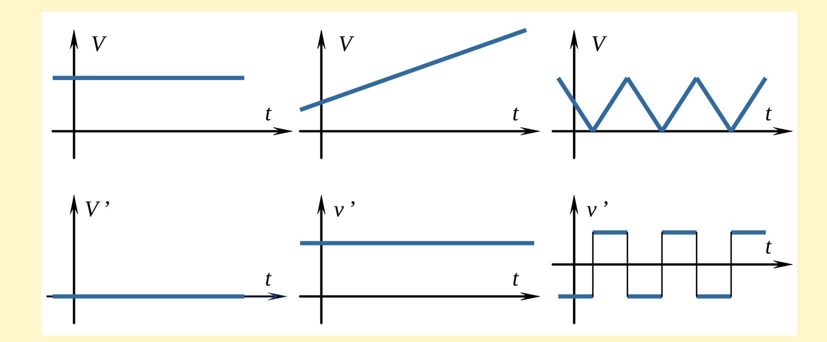
Si en los últimos ejemplos de sumador y restador, las resistencias fueran diferentes, en vez de ser iguales como se supuso por simplicidad, las fórmulas cambiarían; y eso es útil en algunas aplicaciones en las que se desea que en la suma, o en la resta, las cantidades que intervienen tengan influencias o pesos diferentes.

## Derivador, o diferenciador

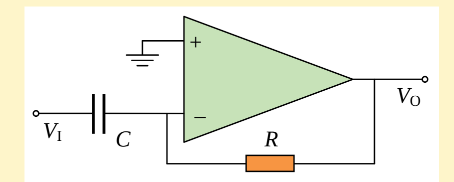
La derivada de una función matemática es otra función que indica cómo varía la primitiva. Si la primitiva es constante, la derivada vale cero; si en cambio crece, la derivada es positiva; y si la función primitiva decrece, la función derivada es, entonces, negativa. La figura que sigue muestra, arriba, tres funciones y(t) y abajo, sus respectivas tres derivadas[5], y'(t).

[4] Eso se deduce así: la corriente que circula por la serie, vale $V_2 / (R + R)$. Entonces, la tensión sobre cualquiera de esos dos resistores vale $I.R = V_2.R / (R + R)$, o $V_2 / 2$.

[5] Por ejemplo, esas tres funciones podrían ser tensiones representadas en función del tiempo. En el tercer ejemplo, el de los gráficos de la derecha (pág. 185), se supone que los vértices de arriba están algo redondeados, para que la derivada cambie de valor en tiempos muy breves, pero no instantáneos, lo que se representa con segmentos casi verticales.




Para obtener la derivada de una tensión variable en el tiempo, se puede usar el siguiente circuito.




$$V_0 = -RC\frac{dV_1}{dt}$$

Una manera de comprender cómo funciona es observar que la entrada + está a tierra, entonces el potencial de la entrada – tiene que ser nulo también. Después imaginamos que la tensión $V_I$ permanece constante durante mucho tiempo; eso hace que la corriente en el capacitor valga cero, ya que ese componente completó su carga, o su descarga. Entonces, la corriente en el resistor vale cero, y el potencial de salida, $V_0$, es igual al de la entrada +; cero. Y justamente, la derivada de una constante es cero. La expresión $\frac{dV_1}{dt}$ se lee: *derivada de la tensión de entrada con respecto al tiempo*.

A continuación, pensemos que $V_I$ aumenta progresivamente. Eso hace circular una corriente de carga hacia la derecha, lo que sólo es posible si $V_0$ se hace negativa, ya que la tensión en + es nula. La tensión en el resistor es igual al producto de la resistencia por la corriente. Esa corriente de carga es proporcional a la capacitancia y a la tasa temporal de aumento de la tensión de entrada, que no es otra cosa que la derivada de la función.

Para derivar una función, el empleo de un amplificador operacional tiene límites prácticos. Si el capacitor es de gran capacitancia, si la resistencia de realimentación es también elevada, y surge una variación muy rápida de la tensión de entrada, entonces el op-amp se volcará a una tensión extrema,[6] y no distinguirá ese caso de otro en el que la derivada sea aún mayor.



- El circuito derivador se puede usar en los detectores pasivos de infrarrojo, para que actúen cuando la radiación que reciben varía con el tiempo, y no meramente cuando hay radiación, porque ésta existe siempre, emitida por las paredes y el suelo tibio. Si alguien se mueve muy lentamente delante de uno de esos detectores, el aparato no actúa.

[6] Se dice, cuando ocurre eso, que el amplificador operacional se satura.

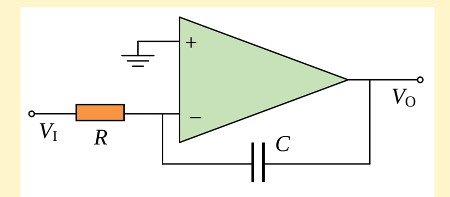
## • Integrador

Integrar una función es la operación contraria a la de obtener su derivada. La integral de una función matemática y(t), es otra función, z(t), tal que la derivada de esta nueva función z(t), es la función anterior, y(t). En símbolos:

$$z(t) = \frac{dy(t)}{dt} \qquad\qquad y(t) = \int z(t)dt$$

Se lee: ***z*** es la derivada de ***y*** con respecto al tiempo, e ***y*** es la integral de ***z*** con respecto al tiempo.

Para integrar una función con un amplificador operacional, sirve el siguiente circuito:




$$V_0 = V_{INICIAL} - \frac{1}{RC}\int V_1 dt$$

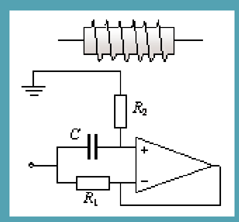
Si la tensión $V_I$, permanece nula, al cabo de bastante tiempo la corriente de carga (o de descarga) del capacitor será insignificante, y las dos entradas quedarán al mismo potencial nulo de tierra. La tensión de salida, en ese caso, será cualquier valor constante; por ejemplo, el que llegó a existir cuando se dio esa condición, y el mismo valor de tensión habrá ente los extremos del capacitor cargado.

Supongamos que esa tensión de salida es positiva, y de 10 V; que el resistor es de 1.000 Ω, y el capacitor, de 1.000 μF, o lo que es lo mismo, 1 μF. Puesto que la entrada – tiene potencial nulo, el capacitor queda cargado con una tensión de 10 V, con el positivo a la derecha.

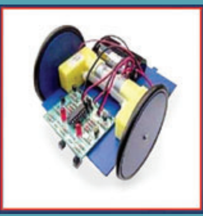
Si, a partir de un cierto instante, la tensión $V_I$ se aparta de cero, y permanece constante y positiva, por ejemplo 1 V, habrá una corriente de carga del capacitor, de valor inicial igual a 1 V / 1.000 Ω, ó 1 mA. Esa corriente hace cambiar la carga del capacitor.[7] Al cabo de un segundo, la carga transferida será de una milésima de coulomb, y la tensión del capacitor disminuirá en 1 mC / 1 mF = 1 V. El capacitor presenta, ahora, una tensión de sólo 9 V, cuando hace un segundo tenía 10 V.

Como el potencial de la entrada del op-amp sigue nula, eso significa que la salida $V_0$ tiene que haber cambiado de 10 V a 9 V.

[7] Recordemos la definición dada en el capítulo 1: *Cuando una carga de un coulomb pasa de un sitio a otro en un tiempo de un segundo, se dice que circula una corriente de un ampere.* Y tengamos presente, también, que la carga eléctrica es igual al producto de tensión por la capacitancia.




• El circuito de la figura simula un inductor, a pesar de que sólo tiene un capacitor y dos resistores (además del amplificador operacional). Desde la entrada, se comporta como una inductancia $L = R_1.R_2.C$ en serie con una resistencia $R_1$.
Una característica de los inductores es que si se les aplica tensión, la corriente comienza a crecer desde cero, y se estabiliza en el valor $I = U/R$. Este circuito ocupa mucho menos lugar que un inductor real, de bobina.



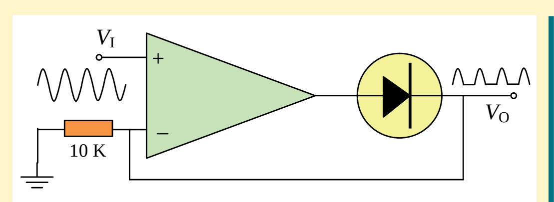
• Robot didáctico impulsado por un motor a pilas, que sigue una línea trazada en el suelo. Está hecho con un circuito integrado de varios amplificadores operacionales.

Si, transcurrido ese segundo, la tensión de entrada $V_I$ volviera a valer cero, la tensión de salida se quedaría fija en 9 V. Si $V_I$ volviera a valer 1 V, $V_0$ volvería a decrecer, al ritmo de un volt por segundo. Y si la tensión de entrada adoptase otros valores, la de salida decrecería, o crecería, según la polaridad de la tensión de entrada, a un ritmo dependiente del valor de la tensión de entrada.

El límite práctico de este circuito integrador es la tensión de alimentación. Cuando el capacitor la alcanza, ya no puede seguir acumulando más carga, y el circuito deja de integrar.

## Rectificador de muy baja tensión

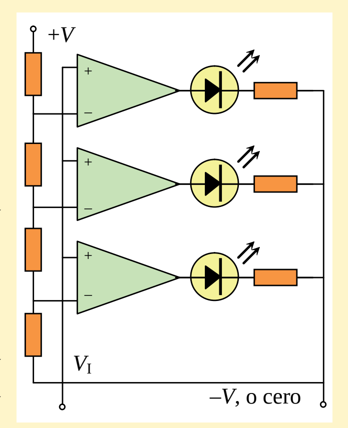
En el capítulo 12, página 141, se comentó que los diodos semiconductores comienzan a conducir sólo después de que se supera una tensión umbral de directa del orden de un volt; es imposible, entonces, sólo con esa clase de diodos, rectificar tensiones alternas menores, pero los amplificadores operacionales brindan una solución.




**Cuando la tensión de entrada es positiva, aunque sea pequeña, la salida crece hasta superar la tensión directa del diodo y, recién entonces, hay realimentación.**

## Indicador de barras

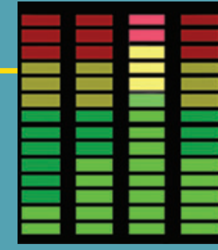
Para indicar diferentes niveles de tensión, temperatura, sonido, u otra variable, sin usar instrumentos costosos, son muy comunes los indicadores de barras. Se puede armar uno con el circuito de la figura; y si se usa el amplificador operacional LM324N, se aprovecha que tiene cuatro op-amp en la misma cápsula de 14 patas, para ocupar muy poco sitio.




La cadena de resistores polariza cada entrada inversora con una tensión diferente. A medida que aumenta la tensión de entrada $V_I$, y cada entrada directa supera el potencial de la entrada inversora, la salida de cada op-amp se vuelca al extremo positivo, y se enciende el led correspondiente. Si se desea la función inversa, se polarizan las entradas al revés.



Antes de armar el indicador de barras descrito, conviene saber que hay integrados como el KA284, para 15 miliampere, y el KA285, para 7 mA, que ya vienen preparados para la función de indicar un nivel de sonido en una escala logarítmica, en decibeles.
Sirven para encender hasta cinco leds; se alimentan con una tensión de 3 a 16 V, y miden 23 × 6 × 6 mm.

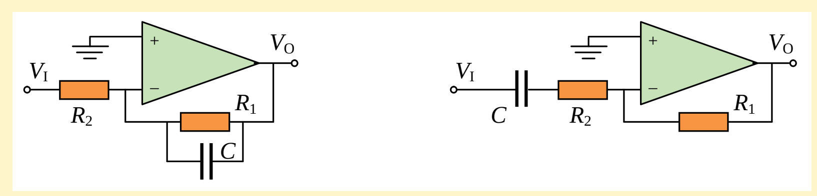


Indicador de nivel de sonido, con cuatro barras de leds para tonos bajos, medios, altos y muy altos. Se lo conoce como *vúmetro* (de VU, unidad de volumen, en inglés).
En algunos modelos baratos, los led encienden de a pares; o cada led asoma por dos ventanas, para que parezca que hay el doble de niveles.

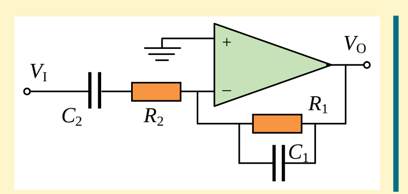
## Filtros

A veces hay que permitir el paso de la corriente de cierta frecuencia, e impedirlo si es de otra; por ejemplo para separar las señales cuando por una misma línea se envían la voz del teléfono, de una frecuencia entre 50 y 50.000 Hz, y el servicio de Internet de banda ancha, de más de 100.000 Hz.

Hay *filtros pasivos* que cumplen esa función, formados por resistores, capacitores e inductores. Los op-amp permiten construir *filtros activos*, llamados así porque necesitan de una fuente externa de energía; pero tienen la ventaja de que se puede hacer un mejor control. Según la frecuencia que dejan pasar, los filtros se llaman pasaaltos, pasabajos, pasabanda, etcétera.




**Izquierda, filtro pasabajos; derecha, pasaaltos. La frecuencia límite, en hertz, vale, en el primer caso, $1/(2\pi R_1 C)$; y en el segundo, $1/(2\pi R_2 C)$, con las resistencias expresadas en ohm, y las capacitancias en farad (F).**




**Filtro pasabanda, de frecuencias límites $1/(2\pi R_1 C_1)$; y en el segundo, $1/(2\pi R_2 C_2)$.**

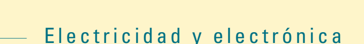
La diferencia entre las dos frecuencias límite es el ancho de banda. El cociente entre la frecuencia central y el ancho de banda se conoce como el factor Q, o factor de calidad del circuito. Cuanto más estrecha es la banda, mayor es el factor de calidad.[8]

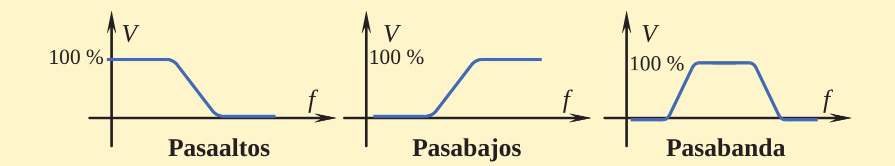
Las frecuencias de límite no son nítidas ni estrictas; el filtro comienza a filtrar desde antes de alcanzarse el límite, y deja pasar algo de señal una vez transpuesto, como lo indican las siguientes figuras.

Una de las muchas maneras de obtener una tensión variable en forma de onda dentada, a partir de una sinusoidal, es aplicar ésta a un comparador, y la salida del comparador, a un integrador.

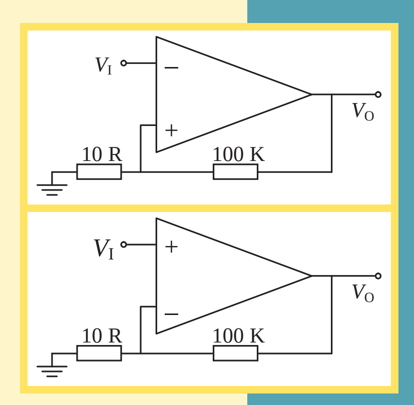
[8] El factor Q de calidad se refiere a la cuán selectivo es un circuito para responder a una única frecuencia, o una banda estrecha alrededor de la frecuencia central. Es una calidad de sintonía. En cambio, cuando se habla de banda ancha para la conexión a Internet, lo deseable es que pasen simultáneamente frecuencias diversas, correspondientes a varios canales de comunicación simultáneos de los diferentes usuarios. En este otro contexto, la buena calidad del servicio consiste en que la banda de frecuencias de comunicación sea amplia, y no estrecha.








## Propuestas de estudio




**15.1.** *(Advertencia- Esta pregunta presenta una dificultad para que la resuelvan los estudiantes, o para que disfruten si la descubren y no caen en ella.)*
Se sabe como dato que en el op-amp de la figura, alimentado con +12 V y –12 V, la tensión de entrada vale $V_I$ = –0,001 V. ¿Cuánto vale la tensión de salida $V_0$?
**15.2.** Con los mismos datos, ¿cuánto vale ahora la tensión de salida $V_2$?
**15.3.** ¿Y si $V_I$ valiera 0,003 V?
**15.4.** ¿Cómo harían un sumador de tensiones sin inversión de la polaridad? Justificar
**15.5.** ¿Cómo se debería conectar un op-amp para hacer un circuito integrador que no invierta su salida, como ocurre con el descrito en este capítulo? Justificar

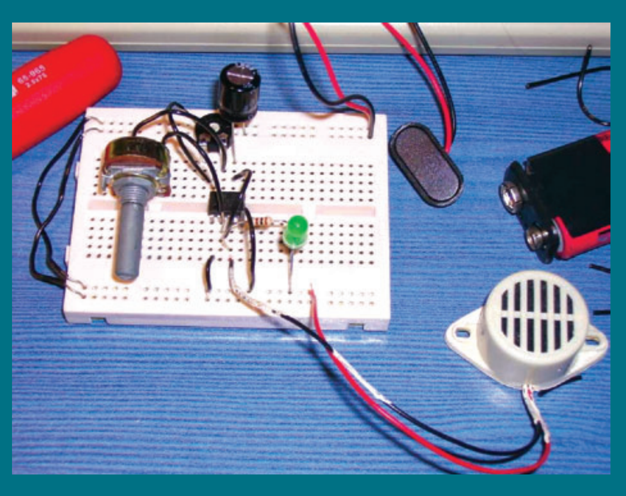
## Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en la Red con las palabras amplificadores operacionales, op-amp, filtros activos, y generador de funciones.
- En estos sitios hay, respectivamente, un excelente capítulo sobre amplificadores operacionales, que forma parte de un curso de Tony R. Kuphaldt. (Está en inglés.), un buen curso en castellano, y datos de un sismógrafo de aficionado:
  *http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/mdp/electric_web/Semi/SEMI_8.html*
  *http://www.ifent.org/temas/amplificadores_operacionales.asp*
  *http://pages.prodigy.net/fxc/*
- Jung, Walter G. *Amplificadores operacionales integrados; circuitos prácticos,* Paraninfo, Madrid, 1991. Este libro está en la Biblioteca de la Universidad Tecnológica Nacional, Medrano 951, Buenos Aires.
- *http://gwenaelm.free.fr/Physique/Cadre/index_capes_mpp.html*



• Toda función analógica que realice un amplificador operacional, la puede hacer también un procesador numérico, y esto es lo que conviene cuando la operación es compleja, por ejemplo en el *Segway*, biciclo paralelo impulsado con baterías, que responde a órdenes de manejo dadas por los movimientos instintivos del cuerpo humano en equilibrio. El aparato, inventado en 2001, aún es muy caro, en comparación con el servicio que brinda.

# Herramientas de experimentación



Hacer las cosas y probar si funcionan –casi nunca exactamente del modo esperado– es el método normal de trabajo, no sólo en electrónica, sino en cualquier otra tecnología compleja. El circuito de la foto, destinado a una alarma casera de tsunamis, incluye una batería, un convertidor de tensión, un amplificador operacional, un potenciómetro de ajuste de sensibilidad, un led, un zumbador, y menudencias. Amplifica la señal que genera la oscilación de un imán que cuelga dentro de una bobina. Está montado en un *protoboard*, o tablero de conexiones experimentales, en el que los componentes se enchufan en vez de soldarse, lo que facilita los cambios, hasta quedar conformes con el prototipo.

El multímetro, o téster, es la herramienta electrónica más usada en el diseño y la reparación. En la figura, uno analógico, que venden a quince pesos en algunos kioscos, y otro más avanzado, de trescientos pesos, digital y con pantalla gráfica, especializado en el diagnóstico de fallas de encendido e inyección electrónica de combustible de los coches.






Abajo, soldador de estaño de 50 W, un soporte de espiral para proteger la mesa de las quemaduras, aleación de estaño y plomo de bajo punto de fusión, y una jeringa que se dispara con un resorte para absorber el metal fundido. Se usa, principalmente, en reparaciones, porque para el armado de los circuitos, la soldadura se suele hacer con una ola que se genera en una cubeta de estaño fundido, sobre la que se coloca la placa del circuito impreso con las patas de los componentes ya puestas en los agujeros. Sin embargo, los prototipos, o circuitos especiales de bajo volumen de producción, se suelen armar con esta útil herramienta. Al lado, un soldador de nitrógeno caliente (mejor que el aire, porque no oxida) para soldar componentes muy pequeños, llamados de montaje de superficie.





# Herramientas de experimentación

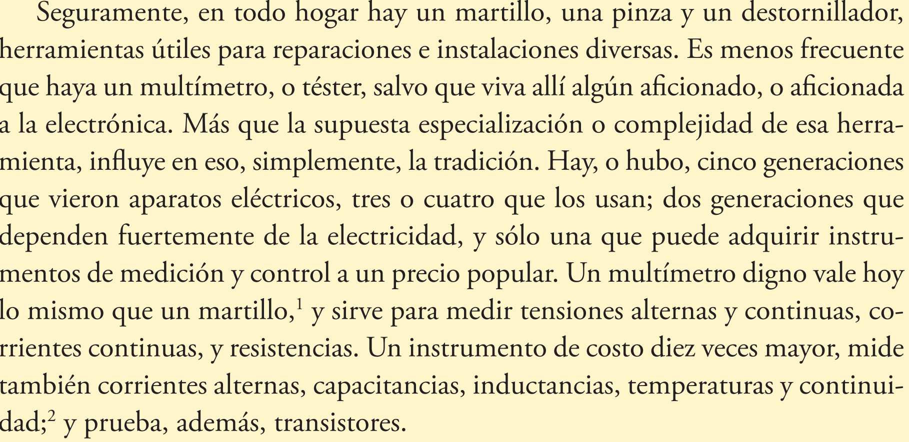
## El multímetro

Seguramente, en todo hogar hay un martillo, una pinza y un destornillador, herramientas útiles para reparaciones e instalaciones diversas. Es menos frecuente que haya un multímetro, o téster, salvo que viva allí algún aficionado, o aficionada a la electrónica. Más que la supuesta especialización o complejidad de esa herramienta, influye en eso, simplemente, la tradición. Hay, o hubo, cinco generaciones que vieron aparatos eléctricos, tres o cuatro que los usan; dos generaciones que dependen fuertemente de la electricidad, y sólo una que puede adquirir instrumentos de medición y control a un precio popular. Un multímetro digno vale hoy lo mismo que un martillo,[1] y sirve para medir tensiones alternas y continuas, corrientes continuas, y resistencias. Un instrumento de costo diez veces mayor, mide también corrientes alternas, capacitancias, inductancias, temperaturas y continuidad;[2] y prueba, además, transistores.

Los multímetros se clasifican en analógicos y digitales. La parte principal de los primeros es un instrumento de aguja, de corriente continua, que en muchos casos indica el fondo de escala cuando circula una corriente de 50 μA (cincuenta millonésimas de ampere) o cuando se le aplica una tensión continua de 2,5 V. De esto deducimos que la resistencia interna de ese instrumento de aguja es de (2,5 V) / (50 μA) = 50 kΩ.

Para resumir esos datos, se suele decir que el instrumento tiene una resistencia de veinte mil ohm por volt.

Algunos multímetros tienen instrumentos de características diferentes a las dichas; por ejemplo indican cien microampere a fondo de escala, o tienen otra resistencia interna. Los digitales suelen amplificar las señales con energía auxiliar



Multímetro digital de bolsillo de 500 V, 20 MΩ, con retención de lectura, de veinte centímetros de largo, tres de ancho y uno de grosor.



Multímetro analógico y digital de 600 V y 20 MΩ, con 7 funciones y 28 rangos.

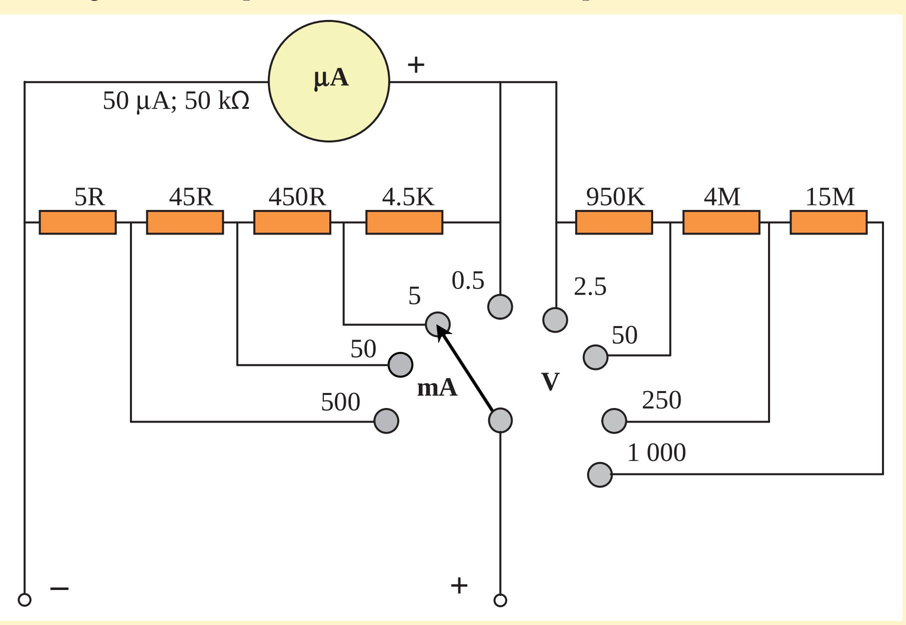
[1] Se supone que el manejo de un martillo es instintivo y congénito, como lo notamos en los movimientos que hace un bebé con los objetos que alcanza; aunque, naturalmente, durante la vida se aprendan destrezas, como la de tomarlo por el extremo del mango para no sufrir vibraciones, golpear con más precisión y disminuir los riesgos de daño personal. En cambio, el manejo de un multímetro muy poco tiene que ver con los instintos, y requiere aprendizaje; eso explica su menor popularidad.

[2] Según los diferentes ámbitos técnicos, se dice que entre dos puntos hay *continuidad*, si no están aislados entre sí; o si la resistencia entre ellos es baja. Muchos multímetros tienen incorporado un zumbador, que emite un pitido cuando se unen entre sí las puntas de prueba del aparato, o cuando se intercala entre ellas algo que tenga una resistencia de menos de 100 ó 200 Ω.

proveniente de pilas, y en su operación como voltímetros tienen, generalmente, una resistencia mayor que la de los instrumentos analógicos.

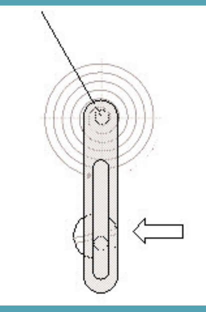
En el capítulo 13, y para mostrar cómo se aplica la polaridad correcta en la prueba de un transistor, anticipamos una descripción simplificada de la conexión interna de un multímetro, con una llave de dos posiciones para medir tensión y resistencia. La mayoría de los multímetros tienen, en cambio, una llave selectora de funciones de catorce posiciones, o más, cada una de las cuales corresponde a una función y un rango de medición diferente, por ejemplo: tensiones continuas y alternas de cero a 10, 50, 250 y 100 V; y resistencias en tres escalas diferentes, en las que las lecturas se multiplican por los factores 10, 100 y 1.000.

La figura muestra parte de la conexión interna típica de un multímetro.




**Conexiones internas de un multímetro para la medición de corrientes y tensiones continuas (la simbología internacional omite los espacios entre caracteres, y usa el punto decimal en vez de nuestra coma: 0.5 por 0,5 y 2.5 por 2,5). La R significa ohm; K, miles; y M, millones.) Con la llave en la escala de 1.000 V, la resistencia del multímetro es de 20 MΩ; en la de 250 V, de 5 MΩ; en la de 50 V, de 1 MΩ; y en la escala directa (la de 2,5 V) la resistencia es de 50 kΩ. En todos los casos es de 20.000 Ω/V; de ahí la utilidad de ese parámetro.**

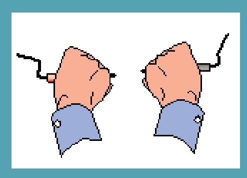
Para medir tensiones alternas, se usan otras posiciones de la llave selectora (que no están representadas en la figura), y un diodo rectificador en serie con uno de los bornes de entrada. Puesto que la tensión directa del diodo es del orden de un volt, los instrumentos analógicos sin amplificación miden con mucho error las tensiones alternas bajas, y no suelen incluir la medición de corriente alterna. Para



Muchos instrumentos de aguja tienen una bobina que se mueve en el campo magnético de un imán. Cuando pasa corriente por la bobina, a través de cables muy delgados y flexibles, aparecen fuerzas electrodinámicas de giro. Cuando la corriente cesa, un resorte antagónico de espiral retorna la bobina a su posición inicial. El ajuste mecánico del cero se hace desde afuera, con un destornillador, a través de un excéntrico que gira levemente el extremo fijo de la espiral.



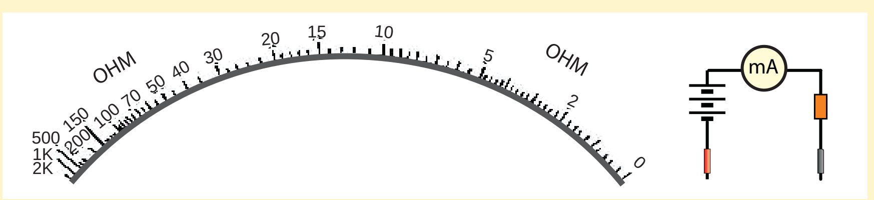

- Por tradición, hoy se usa más la magnitud resistencia (en ohm) que su recíproca, la conductancia (en siemens). Hay instrumentos de escala de conductancia casi lineal, con divisiones muy regularmente espaciadas. Cinco milisiemens corresponden a doscientos ohms, y la menor división, de 0,1 mS, a 10 kΩ.



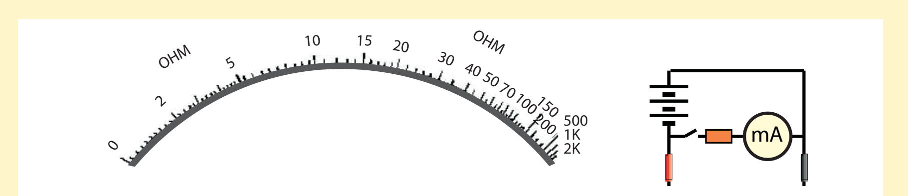
- Casi todos los multímetros, aun los más sencillos, pueden medir la resistencia del cuerpo humano entre las manos húmedas (entre 10 y 100 kΩ); o, al menos, la aguja se mueve al tocar las puntas.

entender la razón, consideremos, por ejemplo, que para medir 200 mA ca con una precisión razonable, se necesitaría generar una caída de tensión bastante mayor de 1 V, que es la tensión que se pierde como caída en el diodo rectificador. Si se usaran, entonces, 10 V, esa tensión se restaría de la que hay entre los extremos del elemento a través del cual circula la corriente alterna que se desea medir, y que en muchos casos es de pocos voltios. La conexión del multímetro alteraría considerablemente el circuito, y hasta haría que deje de funcionar. La medición de corriente alterna es una función que sólo resuelven los multímetros que amplifican la señal, sean analógicos o digitales.

La medición de resistencias usa la energía de una pila interna. La escala en esta función es muy alineal. Tiene, generalmente, el infinito a la izquierda, que se ajusta mecánicamente, igual que el cero de las demás funciones; y el cero a la derecha, ajustable con un potenciómetro, con las puntas de prueba unidas entre sí.




**Escala de medición de resistencias de un multímetro analógico; en este ejemplo, desde cero, a la derecha, hasta dos mil ohm a la izquierda (hay aparatos de mayor sensibilidad). Las resistencias mayores no se aprecian bien, porque la corriente que circula es pequeña y casi no desvía la aguja. El extremo izquierdo de la escala no tiene número, y a veces se pone ahí el símbolo de infinito, ∞. A la derecha, el circuito simplificado.**




**Escala de resistencia con cero a la izquierda, en un multímetro equipado con óhmetro paralelo, *shunt* o baipás. Al conectar un resistor entre las puntas de prueba, la corriente que atraviesa la batería aumenta, pero la del microamperímetro disminuye. Cuando no se lo utiliza, hay que apagarlo con el interruptor, para que no se descargue la batería. Para medir resistencias bajas, el óhmetro paralelo es preferible al óhmetro serie.**

En la medición de tensión o corriente alterna, los multímetros más avanzados miden el valor eficaz. Para eso integran el cuadrado de la tensión (o de la corriente, según el caso) durante un período, calculan el promedio, y obtienen su raíz cuadrada. Los multímetros más sencillos, en cambio, como tienen un diodo rectificador, miden el valor promedio aritmético, y en algunos casos en que se incluye

un capacitor, sólo el valor de cresta. En ambos casos, la escala está corregida bajo la suposición de que la forma de onda es sinusoidal, lo que no siempre se cumple con exactitud; eso introduce errores del orden del 5 %.

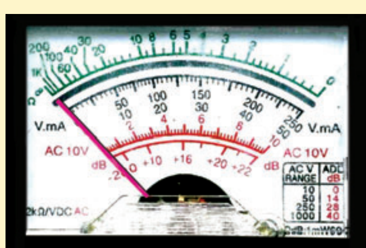
## Medición de la tensión en decibeles

El bel es la unidad de las escalas logarítmicas; y el decibel, un submúltiplo. Del mismo modo en que en un metro hay diez decímetros, diez decibeles equivalen a un bel.

Cuando una magnitud es diez veces mayor que otra, se dice que la supera en un bel. Por ejemplo, si un amplificador multiplica por diez la potencia de entrada, tiene una ganancia de un bel; si la multiplica por cien, la ganancia es de dos bel; y si la salida es mil veces mayor que la entrada, el amplificador es de tres bel, o treinta decibeles. En general, la ganancia, en bel, es el logaritmo decimal del factor de multiplicación. Y en decibeles, diez veces ese logaritmo.

En sonido, el nivel de cero decibel se estableció en $10^{-12}$ W/m$^2$ (un billonésimo de watt por metro cuadrado), densidad de potencia correspondiente, aproximadamente, al sonido más débil que percibe el oído humano promedio.

Por razones históricas relacionadas con el calibre del alambre de las líneas telefónicas, y con las unidades inglesas de longitud, se estableció que el cero decibel eléctrico corresponde a una potencia de 1 mW, desarrollada en una resistencia de 600 Ω. Eso corresponde a una tensión de 0,775 V eficaces.[3] Cuando un voltímetro marca 0,775 V, indica entonces, convencionalmente, cero decibel. Si la tensión es diez veces mayor (7,75 V), la potencia es cien veces mayor, esto es, dos beles (ó 20 dB) más alta.




Para medir la tensión en decibeles con un multímetro, se utiliza la escala correspondiente; en el caso de esta figura, la roja inferior.

Se ve en la escala que el cero decibel corresponde a 0,775 V de tensión alterna; y 20 dB, a 7,75 V. Abajo a la derecha, una leyenda recuerda la definición convencional; 0 dB: 1 mW 600 Ω. La tabla instruye cómo hacer la lectura según qué escala de tensión alterna se utilice. Si se usa la de 10 Vca, se lee directamente, sin sumar nada (*Add* 0). Si se emplea la escala de 1.000 Vca de alcance, como esa tensión es 100 veces mayor que la anterior, la potencia es entonces 10.000 veces




El cero decibel (o nivel de referencia de intensidad sonora) es independiente del sonido de un parlante que desarrolle 1 mW de potencia.
El concepto de decibel es muy amplio, y se aplica a cualquier factor de multiplicación o de atenuación, aunque sea más conocido el del sonido. Hay decibelímetros que miden el nivel sonoro, otros que miden el nivel de señal en los cables de TV, otros la ganancia de amplificadores, etcétera. En la foto, un decibelímetro de comunicaciones, y otro de sonido.

[3] A partir de las relaciones $P = U.I$, y $R = U/I$, se obtienen $U = \sqrt{P.R}$, y $P = U^2/R$, donde $U$ es la tensión, en volt; $R$ es la resistencia, en ohm; $I$ es la corriente, en ampere; y $P$ la potencia, en watt.

mayor, porque a resistencia constante, la potencia depende del cuadrado de la tensión. Un factor de 10.000 corresponde a 4 bel, o 40 decibeles. Entonces, y como dice la tabla, si se lee en la escala de 1.000 Vca, a lo que indique la escala roja de decibeles, hay que sumarle 40 dB (Add 40). Si se mide de cero a 250 Vca, la tensión leída es 25 veces mayor que 10 V. El logaritmo decimal de 25 × 25 es 2,796, aproximadamente 2,8 bel, o 28 dB, que es el número rojo anotado a la derecha de 250.

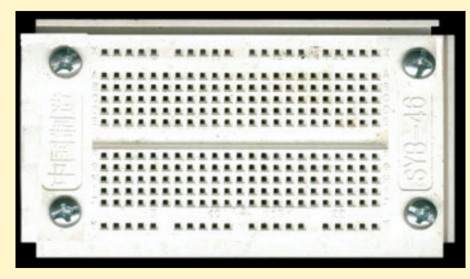


Detector de cristal líquido, sin pilas

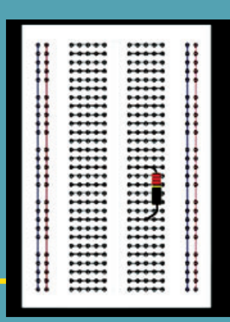
## El tablero de prototipos



Buscapolos electrónico con pilas, díodos luminosos, zumbador y selector de sensibilidad.




Esta útil herramienta de experimentación y desarrollo es más conocida por su nombre en inglés, protoboard, o breadboard. Consiste en un conjunto de enchufes agrupados en hileras, detrás de una superficie perforada con agujeros en forma de embudo, en los que se insertan las patas de circuitos integrados, transistores, resistores, leds, y cualquier componente con alambres de conexión normalizados, de aproximadamente medio milímetro de diámetro. Los enchufes están conectados en grupos. Hay tableros muy pequeños, para circuitos sencillos de aficionados, y otros con miles de enchufes, y fuentes de alimentación eléctrica incorporadas, para desarrollos profesionales. La velocidad de experimentación es muy grande, porque no se pierde tiempo en soldar y desoldar. Pero el circuito definitivo debe soldarse, para evitar falsos contactos causados por la oxidación en ambientes húmedos.



El modelo de breadboard SYB-46 de Cixi Wanjie (China) tiene 270 contactos agrupados como se ve en la figura, y acepta calibres de alambre de 29 a 20 AWG, o de 0,286 a 0,812 mm de diámetro (el capítulo 6 se refiere a esa norma estadounidense de calibres de alambre).

## Aplicaciones del buscapolos electrónico

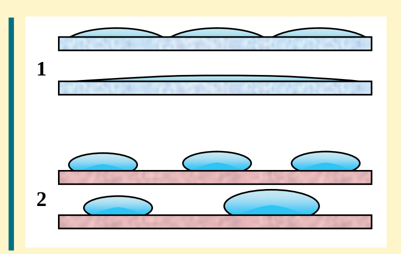
En el capítulo 1 se describió el uso de un buscapolos electrónico (de los que se compran en ferreterías y casas de electricidad, y funcionan con pilas) para experimentar con cargas de inducción electrostática; y el 13 mostró cómo construir uno sencillo. Hay muchos modelos disponibles de buscapolos o detectores de tensión. Los hay sin pilas, con indicadores de cristal líquido, que aunque tienen una pantalla de dígitos, su funcionamiento es analógico:



**Sensible buscapolos parecido a los tradicionales, pero con un díodo luminoso en vez de lámpara de neón. Lleva dos pilas, un carbón de seguridad limitador de corriente, y dos transistores.**

cuanto más intensa es la señal, más números aparecen, y más intensamente marcados, sin que ninguno indique con exactitud la tensión, sino apenas su orden de magnitud. Estos aparatos, que hoy se consiguen por dos o tres pesos, aparecieron en el comercio hace apenas quince años, a pesar de que se los podía fabricar desde mucho antes; ése es un indicio de la popularización de la electricidad y la electrónica. Con los de pila y sonido se pueden medir –o estimar– resistencias muy altas, del orden de $10^{11}$ Ω.

Si se apoya la punta de prueba de un buscapolos sonoro sobre un vidrio y se toca el vidrio con la otra mano, el buscapolos no suena; pero sí lo hace cuando se echa el aliento sobre el vidrio y se condensa agua; y sigue sonando hasta que el agua se evapora, proceso que se puede acelerar si se abanica con un cuaderno. En cambio, los plásticos no conducen, aunque se les eche aliento y se los salpique, porque el ángulo de acuerdo entre el agua y el sólido es agudo en ese caso; en otras palabras, el vidrio se moja más que el plástico.




**• 1.- Vidrio mojado con el agua condensada del aliento. El ángulo de acuerdo es obtuso; las gotas se tocan cuando crecen y forman una lámina continua conductora de la electricidad.**

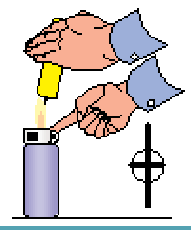
**• 2.- Un plástico también condensa, pero el ángulo agudo de acuerdo entre el sólido y el líquido hace que si se tocan dos gotas, se forme una más grande desconectada de las demás; el agua entonces no conduce entre puntos distantes.**

El papel parece aislante al probarlo con este método, pero muchas hojas de cuaderno agrupadas se muestran conductoras. Una sola hoja de papel conduce cuando le echamos el aliento, pero difícilmente se seque espontáneamente; hay que ayudarla con una llama; o, en más tiempo, con el calor del cuerpo.

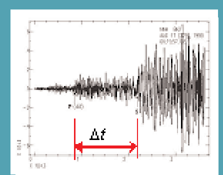
Una llama conduce, y no los gases fríos. Por eso cuando una nave espacial regresa a la atmósfera, durante unos minutos no hay comunicación posible con Tierra, porque el trasbordador envuelto en aire ionizado queda tan aislado de las comunicaciones, como un teléfono inalámbrico envuelto en papel de aluminio.

Una propiedad curiosa de las llamas es que conducen más hacia un lado que hacia el opuesto; ese efecto rectificador se usa en sensores de llama piloto de algunos hornos industriales, porque es más seguro que el de bulbo térmico que vemos en estufas y calefones.

Si se trazan líneas con lápiz de grafito en un papel, se comprueba cómo conducen, y es curioso el efecto de módem o exploración digital en el sonido entrecortado que se oye cuando deslizamos el sensor a lo largo de un renglón escrito en lápiz. Lo mismo se observa en ciertas bolsas de plástico con un diseño de rejilla conductora, en las que envuelven plaquetas de computadoras para protegerlas de la estática.



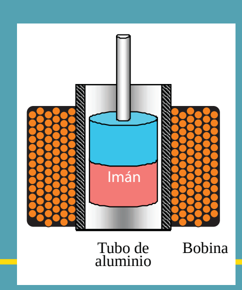
• Las llamas conducen la corriente eléctrica en un sentido, más que en el opuesto, efecto útil para el control de pilotos de hornos. Este efecto, mencionado en el capítulo 11 como rectificación de llama, se puede experimentar fácilmente con un buscapolos electrónico sonoro, y un encendedor. El aparato suena cuando la llama da en la punta de prueba, pero no si se toma ésta con la mano, y se aplica la llama al otro contacto del buscapolos.



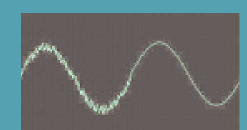

• La magnitud de un terremoto en la escala de Richter se obtiene con la fórmula de abajo, en la que A es la amplitud de las ondas en centímetros, y Δt, el tiempo que transcurre entre la llegada de las ondas longitudinales, *P*, y las transversales, *S*. La segunda fórmula da, aproximadamente, la aceleración del terreno.

$$M = \log\left(\frac{A}{1\ \mathrm{cm}}\right) + 3\log\left(\frac{8\Delta t}{1\ s} - 2{,}92\right)$$

$$\log\left(a / 1cm.s^{-2}\right) = \frac{M}{3} - \frac{1}{2}$$




La amortiguación mecánica del sismógrafo puede ser de aceite, o para mayor higiene, de aire, si las arandelas se mueven con muy poca holgura en el recipiente. Otra manera de amortiguar los movimientos es hacer que el imán deslice dentro de un tubo de bronce o aluminio. El movimiento induce corrientes de efecto magnético opuesto al movimiento. Un exceso de frenado puede disminuir la sensibilidad.



Los factores grandes de amplificación son, al principio, fuente de sorpresas o efectos curiosos. Es que se amplifica, no sólo lo que se pretende (en este caso la señal inducida en la bobina), sino también la inducción de aparatos eléctricos cercanos. Es importante, a veces, la conexión a tierra, el filtrado con capacitores en paralelo, y el blindaje. En la foto, una señal ruidosa, y enseguida filtrada, en un osciloscopio.

El campo eléctrico de una pantalla de TV se nota mucho, y se detectan las variaciones de brillo de la imagen.

## Sismógrafo electromagnético

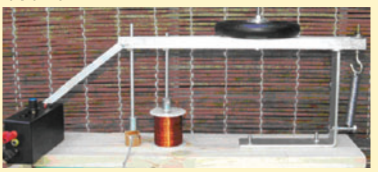
Si se mueve una bobina en las cercanías de un imán, o éste con respecto a aquélla, en la bobina se induce una fuerza electromotriz. Para hacer un sismógrafo, se mantiene el imán suspendido (colgado de un hilo, o flotante), de modo que cuando el terreno se sacude por el terremoto, el imán se queda quieto, y se produce un movimiento relativo entre el imán y la bobina. La fuerza electromotriz generada se amplifica y se conecta a un registrador gráfico, o a un convertidor analógico digital que entregue los datos a una computadora, para hacer cálculos con ellos y presentar los resultados en forma de registro gráfico. En aparatos más sencillos, las oscilaciones se pueden ver en la aguja de un multímetro; y aun sin eso, se puede disparar una alarma sonora, o encender una luz.

Un sismógrafo es entonces, esencialmente, una pesa colgada. Su período de oscilación tiene que ser bastante mayor que el de las oscilaciones sísmicas, de una o dos por segundo. De otro modo, cuando el aparato siga oscilando cuando el sismo finalice, interpretaremos erróneamente sus movimientos.

El sismógrafo lateral mencionado en el capítulo 15 satisface muy bien la condición dicha. Bien ajustado, y con tornillos de nivelación en la base, se puede conseguir un período de oscilación de un minuto, o más. Pero el que sigue, aunque no cumple eso, es más fácil de hacer, y de llevar de un sitio a otro.

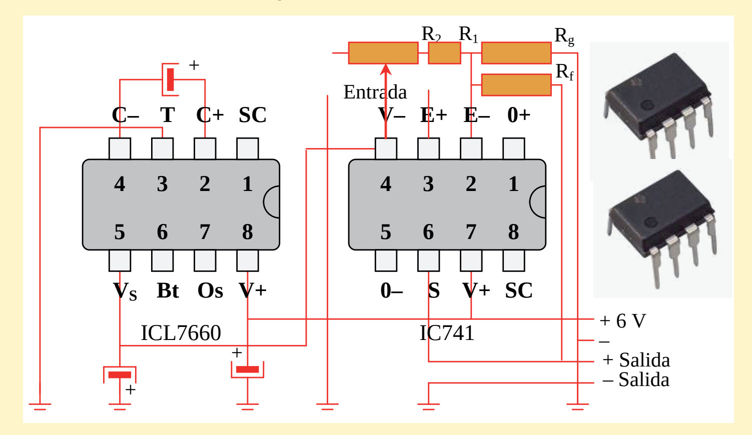


**Sismógrafo portátil, hecho con un bastidor de caños de plástico de media pulgada,[4] adheridos, un resorte blando, y uno o dos imanes de parlante sumergidos en un recipiente con aceite, para la amortiguación. Alrededor se arrollan unas 300 vueltas de alambre de cobre esmaltado. El aparato es sensible a oscilaciones verticales del suelo, como las de muchos terremotos, y las originadas en el tránsito de personas y vehículos. Abajo, una variante de mayor período de oscilación, con un resorte fuerte, una pesa de gimnasio, y un imán que cuelga dentro de un carrete de alambre tal como lo venden, por lo que no hay que bobinar.**



[4] Las medidas inglesas son las que prevalecen, todavía, en los comercios argentinos y estadounidenses.

La figura muestra la conexión, que se puede realizar en un protoboard pequeño, como lo muestra la primera página de este capítulo.




La parte principal del circuito es un amplificador operacional IC741. Con el fin de usar una sola batería, y no dos simétricas, se emplea también un convertidor de tensión ICL7660. Este circuito integrado se alimenta con +6 V (máximo, 10 V), y entrega –6 V.

Siguen los significados de los símbolos y abreviaturas: +6V, entrada de batería; 0+ y 0–, ajuste de cero; E+ y E–, entradas del amplificador operacional; V+ y V–, alimentación del op-amp; S, salida del op-amp; SC, sin conexión; C+ y C–, positivo y negativo del capacitor; T, tierra; VS, tensión de salida del convertidor; Bt, baja tensión del convertidor (aquí no se usa); Os, oscilador del convertidor (tampoco se emplea en este circuito). R1 = 47 Ω; R2 = 1 MΩ; Rf = 180 kΩ; Rg = 2,2 kΩ. Con 22 kΩ, la ganancia se divide por 10; y con 220 Ω, se multiplica por 10. Los tres capacitores son de 10 μF cada uno, polarizados, o electrolíticos.

Entre la pata 3 del IC741 y tierra (entrada), se conecta la bobina del sismógrafo; y entre la pata 6 y tierra (salida) se pone un multímetro, un zumbador, o un led con un resistor en serie, para que indiquen las oscilaciones.

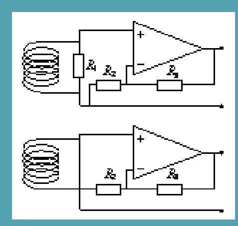
El sismógrafo en muy sensible, y con modelos similares hubo aficionados que detectaron no sólo sismos, sino también ensayos nucleares en la época de la llamada guerra fría, entre 1947 y 1991, cuando abundaban esas pruebas militares.

## Diseño de circuitos asistido por computadora

Las ideas que tenemos de la realidad no son tan complejas como el mundo material; por eso las simulaciones de casos en computadoras muchas veces se apartan, considerablemente, de la realidad. Sin embargo son muy útiles, porque permiten



- Antiguamente los sismos se evaluaban con la escala de Mercalli, basada en los efectos destructivos, los que, naturalmente, dependen de la calidad de la construcción. La escala de Richter, más objetiva, también tiende a su reemplazo por otra, la del *momento sísmico*, que considera, además de lo que marca el sismógrafo, el área de la rotura, y la elasticidad de la roca. Los sismos suelen ser destructivos a partir de la magnitud 6, aunque en países de construcciones muy reforzadas, como el Japón, los daños son menores. En la foto, daños por el terremoto de magnitud 8 en Pisco, Perú, 2007, con mil muertos.



- Dos variantes más sencillas de amplificador para el sismógrafo. Según el número de vueltas de la bobina, anda mejor uno, u otro. $R_1$ reduce el ruido eléctrico que la bobina capta del ambiente.

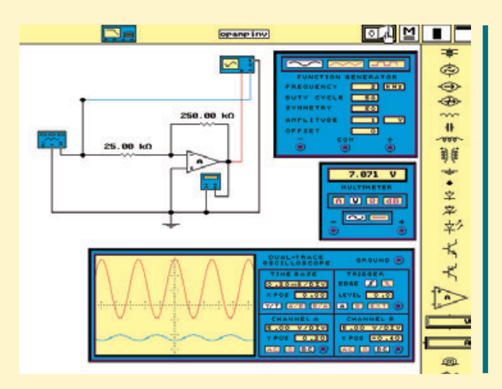
hacer muchas pruebas en poco tiempo, y sin gastos, de modo que la experimentación posterior con prototipos resulta más orientada a los fines prácticos.

Mencionamos aquí dos ejemplos opuestos (en tamaño, edad y potencia) de software de uso libre, que se puede descargar gratuitamente de la Red, el *Electronic Workbench* y el *Quick Field*.[5]

El primero, de *Interactive Image Technologies LTD*, canadiense, en su versión de 1981, ocupa sólo 0,5 MB (megabyte); incluye aplicaciones analógicas y digitales, y funciona tanto con el sistema operativo DOS, como con Windows. Una columna de la pantalla ofrece elementos para arrastrar y poner en el circuito: resistores, capacitores, inductores, transistores, amplificadores operacionales, transformadores, generadores, pilas, diodos rectificadores, luminosos, Zener, amperímetro, voltímetro, osciloscopio de dos canales de doble trazo en colores diferentes (para repre¬sentar gráficamente la tensión en dos puntos del circuito a la vez), y otros elementos.

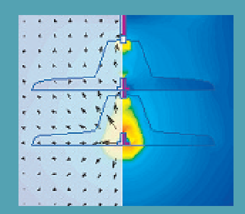
La figura siguiente muestra un circuito sencillo con un amplificador operacional en conexión inversora, al que se le aplica, a la entrada, una tensión alterna de 1 kHz y 1 V de tensión de cresta, o amplitud.[6] El lazo de realimentación negativa del operacional es de 250 kΩ, y la resistencia de entrada, de 25 kΩ; entonces el factor de multiplicación es de diez; y justamente la tensión a la salida, indicada por el voltímetro, es de 7,071 V eficaces, cuyo valor de cresta, o amplitud, vale $\sqrt{2} \times 7{,}701 = 10$ V, exactamente diez veces la amplitud de entrada.

Los cables que van al osciloscopio se identifican en rojo y azul, en correspondencia con los trazos en la pantalla.




**Aspecto del *Electronic Workbench*, o banco virtual de pruebas. El dedo sobre el interruptor, arriba, inicia la simulación. A la derecha, los elementos disponibles, entre ellos un punto de ramificación de conexiones. Si se cometen errores gruesos de diseño (cortocircuitos, falta de tierra), el programa lo advierte.**

Protoboard simulado por el programa MultiSim, que permite a los estudiantes cometer muchos errores iniciales, y aprender de ellos, sin destruir material, un poco antes de hacer las verdaderas prácticas.



Simulación del servicio de una cadena de aisladores de porcelana. A la derecha, las zonas de diferente intensidad de campo eléctrico. A la izquierda, las flechas indican la dirección y el sentido del campo en cada punto y un dado instante.

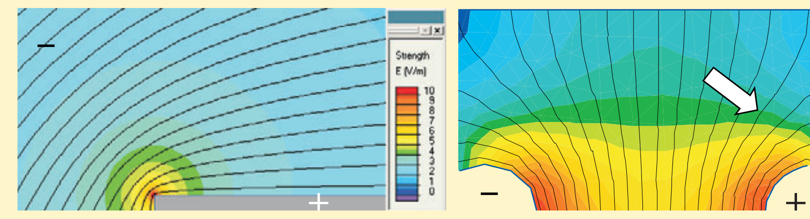
[5] Esos programas (uno de ellos muy antiguo) son bastante avanzados. Hay numerosas variantes en Internet, muchas de las cuales sólo se ofrecen gratuitamente durante períodos de prueba, para que los posibles compradores vean si el producto les sirve. Después esos programas se paralizan, y sólo se pueden seguir usando si se los compra.

[6] A veces, a la tensión de cresta de una tensión sinusoidal se le dice *semiamplitud*, en vez de amplitud, para que no se confunda con el valor de pico a pico, que es el doble.

## • Software para el estudio de circuitos y campos

El Quick Field 5.6 para estudiantes[7] es un avanzado programa de cálculo gratuito y libre, de uso muy sencillo. Hay una versión profesional que se compra, y que difiere de la de estudio sólo en la precisión de los resultados. Para permitir la descarga del programa, el proveedor pide los datos del solicitante; pero no los verifica, ni impone un registro; tampoco envía propaganda después.

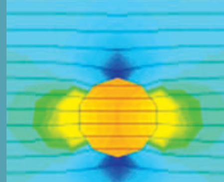
El programa, de un tamaño de más de 36 MB, además de resolver circuitos, ofrece una planilla cuadriculada para que el usuario trace la geometría del problema que le interesa, e imponga las condiciones de contorno. Finalizado eso, el programa divide el área en zonas triangulares, cuyos vértices se llaman nodos, y en fracciones de segundo resuelve un sistema de tantas ecuaciones como nodos existan, y presenta los valores gráficamente. También es posible poner el cursor en el punto en el que interese conocer el módulo o las componentes de la inducción magnética, del campo eléctrico, o del potencial, y los valores aparecen escritos.




• Imágenes del Quick Field. Izquierda, esquina metálica en aire. El campo eléctrico es máximo cerca del borde. Derecha, esferas conductoras de 25 cm de diámetro, separadas medio metro; una a tierra, y la otra a 10.000 V. Las líneas unen puntos del mismo potencial; por ejemplo, la equipotencial señalada corresponde a 7.500 V. En colores, la intensidad del campo eléctrico, unos 30 V/mm cerca de las esferas, y 15 V/mm en el medio.

El programa acepta simetrías de traslación y de rotación, calcula capacitancias, y tiene en cuenta la permitividad de los diferentes medios. Es útil para el diseño de piezas sometidas a tensiones elevadas, y para estudiar la conducción térmica y eléctrica a través de cuerpos de diferente forma, tamaño y conductividad.





• Burbujas de aire atrapadas en un aislador de plástico. Abajo, estudio realizado con el Quick Field 5.4 para estudiantes. En el aire, el campo eléctrico es más intenso que en la resina, como lo indica el programa con un color diferente, y por el hecho de que las líneas de igual potencial están ahí más apretadas. En teoría, el aumento está dado por $3\varepsilon/(2\varepsilon+1)$, donde $\varepsilon$ es la permitividad relativa de la resina; en este caso, 3.

## Propuestas de estudio

**16.1.** ¿A cuántos decibeles de tensión equivalen 220 V? (pueden obtener la respuesta por dos métodos diferentes; uno es hacer el cálculo, y el otro consiste en extraer el dato de la escala del multímetro reproducida en este capítulo, sin hacer cuentas).

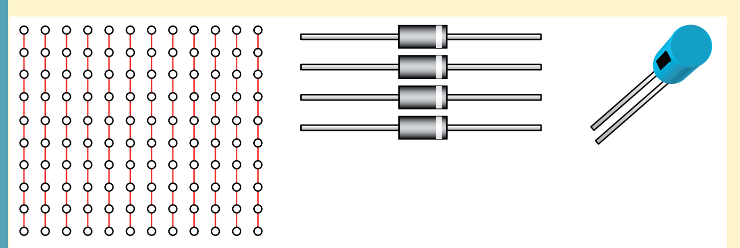


• Pantalla digital que simula ser analógica. Permite una apreciación visual rápida de una magnitud, sin interpretar números.

[7] Una o dos veces por año, la compañía Tera Analysis publica una nueva versión mejorada del Quick Field. Las destinadas a estudiantes son gratuitas, y de uso libre.

**16.2.** ¿Cómo dispondrían, en un breadboard, o tablero experimental de conexiones como el de la figura, los diodos y el capacitor, para cargar éste con la salida de un rectificador de onda completa? (se pueden cortar y doblar los alambres como convenga).

**16.3.** Se conecta un resistor de 1 MΩ a uno de los bornes de una batería de 9 V, y con ese resistor en serie, se le mide la tensión con un multímetro de 20kΩ/V. ¿Cuánto marca ese multímetro, respectivamente, en las escalas de 2, 5, 10, 25 y 250 V?



**PARA INVESTIGAR**

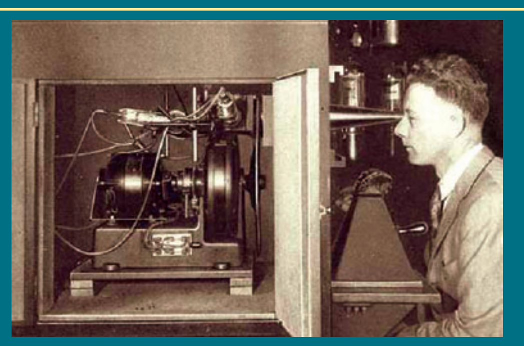
**1.** ¿Cómo se podrían filtrar las vibraciones causadas por el tránsito, en un sismógrafo con amplificación eléctrica?

**2.** A pesar de que las pantallas digitales parecen dar la misma información que los indicadores de aguja, o aun mayor, muchos prefieren los instrumentos analógicos, sean multímetros, relojes, diales de sintonía, u otros aparatos. ¿Cuál se puede imaginar que sea la razón de esa preferencia?

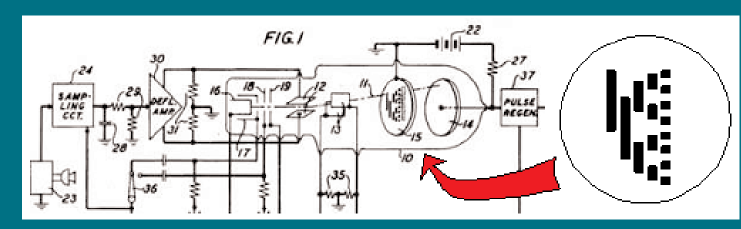
## Otras fuentes de estudio e información

- Sugerimos buscar en la Red con las palabras instrumentos de electrónica, medidores, CAD (diseño asistido por computadora), simulación, y protoboard, o breadboard, virtual.
- En estos sitios está la antigua versión 2a para DOS del simulador de circuitos Workbench. (En Vetusware hay que registrarse para obtener el archivo). Es un archivo muy pequeño, de apenas medio megabyte.
- *http://www.mediafire.com/download.php?mqmmmwdjgmj.*
  *http://vetusware.com/download/Electronic%20Workbench%202.0a/?id=3940.*
- El Quick Field se puede descargar de *http://www.quickfield.com.*
- En *http://www.cs.york.ac.uk/netpro/bboard/jbreadboard.html* hay una apliqueta (o *applet*) Java en línea, que simula un breadboard, o protoboard, con el que se pueden armar circuitos, y probarlos, sin necesidad de descargar un programa.
- Curso de electrónica, de nivel intermedio: *http://www.aprenderelectronica.tk.*
- Experimentos de electrónica, Scatrón–Dinova. Es un kit muy elemental, para fines, principalmente, recreativos, con material de experimentación y un manual muy breve. A pesar de que es un juguete, hay profesionales que lo recuerdan como una fase importante y temprana de sus estudios y práctica.
- Gerrish, Howard H., *Experimentos de electrónica (Enseñanza de conceptos modernos)*, Limusa, México, 1969.

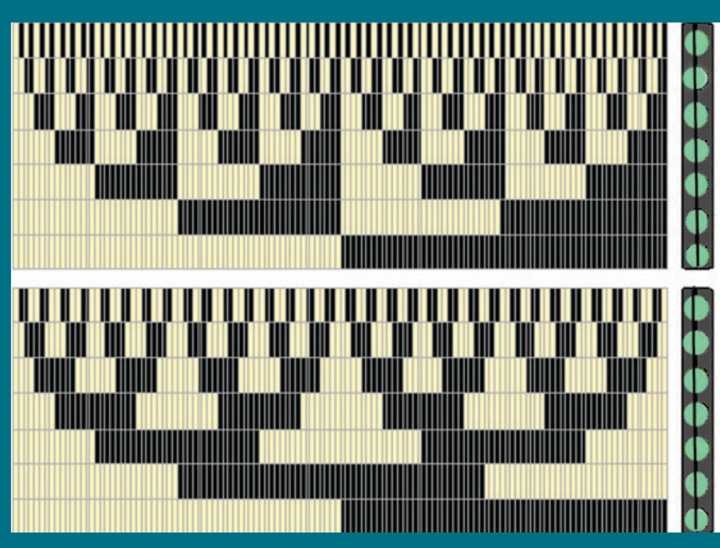
# Introducción a las técnicas digitales



● Frank Gray, investigador de los Laboratorios Bell, e inventor de una de las formas de transmitir señales de TV en colores, patentó el primer aparato de telefonía digital, para disminuir el ruido y las interferencias, además de permitir la codificación de comunicaciones privadas. La voz registrada por un micrófono genera una señal eléctrica, de la que se obtienen frecuentes muestras periódicas. Cada muestra de señal desvía verticalmente el haz de un tubo de rayos catódicos, el que además tiene un barrido horizontal regular. Según la altura a la que el haz electrónico incide sobre una placa perforada, el chorro de electrones se entrecorta de manera diferente, y así se generan pulsos en código, que se transmiten, se interpretan en destino, y con esa información se reconstruye el sonido.




● Fragmento de la patente 2632058, de Frank Gray, Estados Unidos de América, 1953.



● *Abajo:* Detector numérico de desplazamiento. En cada posición de la barra de siete fototransistores, algunos reciben luz y otros no; se sabe entonces en cuál de las 128 líneas verticales se encuentra la barra detectora. Tiene el inconveniente de que el paso de una línea a la contigua, a veces implica el cambio de estado de varios renglones a la vez, y si esos cambios no suceden simultáneamente, surgen señales falsas de posición. Abajo, variante inventada por el mismo investigador, llamada en su honor el *código Gray*. En la transición de una línea vertical a la contigua, sólo cambia de estado un renglón a la vez, y no aparecen señales falsas, aun cuando el trazado pueda ser algo impreciso.

# Introducción a las técnicas digitales

## Analógico y digital



Digital viene de dígito: número, o cifra; pero también dedo; porque se los usa para contar. *Cálculo* es una operación con números, y también significa piedra. Lo mismo pasa con las *cuentas* de un collar o de un ábaco. Todos esos nombres ponen de manifiesto el carácter discontinuo de los números naturales (1, 2, 3, ...), en los que se basa la electrónica digital. Arriba, la cuenta $3 \times 9 = 27$. Foto: Pete Ganzel.



La base de la lógica de Aristóteles fue la clasificación de las afirmaciones en verdaderas o falsas, sin medias tintas. George Boole (1815–1864) formalizó la idea con signos y ecuaciones, que se conocen como *operadores booleanos*, y el álgebra de Boole.

El funcionamiento de un aparato es *analógico* si la variación continua de una magnitud ocasiona una variación, también continua, de otra magnitud diferente. Por ejemplo, el termómetro de aguja de un horno responde a los cambios continuos de una magnitud, la temperatura, con variaciones continuas de la posición angular de la aguja. En cambio, un aparato es *digital* si las variaciones continuas de una magnitud ocasionan *saltos* de otra. Por ejemplo, en el termómetro clínico de la figura, el cambio progresivo de la temperatura ocasiona que, en la pantalla, un número salte al que le sigue.



Hubo una época en la que el pensamiento digital fue un estorbo para la ciencia. Aristóteles de Estagira (384–322 aC) clasificaba los cuerpos en cálidos y fríos, graves y leves, móviles y quietos, húmedos y secos, de una manera *binaria*, con sólo dos posibilidades opuestas. Galileo Galilei[1] (1564–1642), en cambio, rechazó esa filosofía, y distinguió *grados continuos* de temperatura, de velocidad, de peso. El pensamiento de Aristóteles era digital; el de Galileo, analógico; y con él pudo avanzar más en el conocimiento de su época. Pero en el siglo pasado las cosas cambiaron por completo. Los triodos de vacío, transistores, amplificadores operacionales y compuertas lógicas, permitieron hacer miles de millones de operaciones numéricas por segundo, aproximar con gran precisión cualquier cantidad continua a números, operar con ellos, y obtener resultados más veloces, precisos y útiles que con métodos analógicos.

Las compuertas lógicas, que se tratarán enseguida, aplican casi sin cambios la lógica formal, inventada por Aristóteles hace 23 siglos.[2]

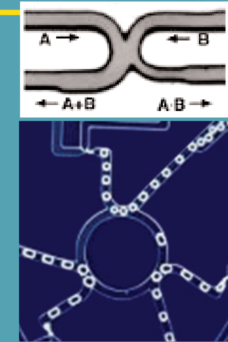
[1] Muchos coinciden en señalar a ese sabio italiano como el iniciador de la ciencia moderna; y que por eso, en vez de llamarlo por su nombre, Galileo, habría que referirse a él por su apellido, Galilei, como se estila con los investigadores e investigadoras modernos.

[2] *Todos los hombres son mortales; Sócrates es hombre; por lo tanto, Sócrates es mortal.* La frase se emplea en los cursos elementales de lógica, como forma concreta de la propiedad Todo ***q*** es ***r***, todo ***p*** es **q**. Por tanto, todo ***p*** es ***r***. Ese lenguaje lo introdujo Aristóteles, discípulo de Platón, quien a su vez lo fue de Sócrates.

# Compuertas lógicas

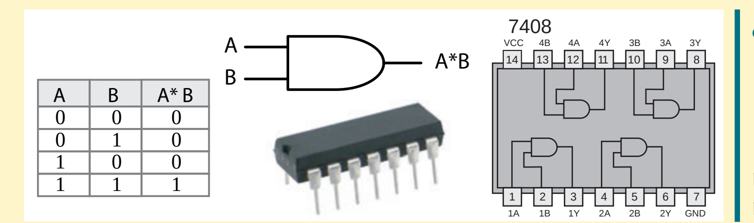
Imaginemos que un ascensor automático debe esperar veinte segundos en la planta baja del edificio, para que bajen y suban los pasajeros. Pero si ya colmó su capacidad, es innecesario que espere, porque perdería tiempo; entonces puede partir. Y aun con el tiempo vencido, y si hay sitio, un sistema detector podría darse cuenta de que se aproxima un pasajero a paso vivo; entonces lo podría esperar, o ignorarlo si la cabina está llena. Por otra parte, si nadie subió todavía, sería inútil que el ascensor arranque cumplido el tiempo de espera, porque viajaría vacío y en vano; salvo, naturalmente, que lo llamen desde arriba. A todo esto, si alguien aprieta el botón de alarma, o impidió el cierre de la puerta, se debería suspender la partida. Esas siete condiciones, entre otras posibles, se dan por sí o por no, y no por grados, y requieren un procesamiento *lógico binario*. Es ahí donde intervienen circuitos con compuertas lógicas.

Las compuertas lógicas son variantes de amplificadores operacionales, cuya salida, en vez de entregar una tensión que puede variar entre +V y –V, sólo puede valer o bien cero, o bien +V, y nunca un valor intermedio.[3] La compuerta lógica es el caso más simple de circuito digital, porque sólo puede adoptar dos estados, llamados pasivo y activo, no y sí, o cero y uno. Las compuertas más comunes son las AND, NOT, NAND, OR, NOR y XOR.[4] Por simplicidad, en lo que sigue se omite representar la alimentación auxiliar, y se dibujan sólo las entradas y la salida.




- Para hacer compuertas lógicas se pueden usar circuitos integrados, relés, válvulas de vacío y hasta *fleurics*, o unidades fluídicas, tubos por los que circulan gases o líquidos. En la imagen, una compuerta fluídica que computa el valor AND y el OR. Abajo, una variante con burbujas.
La fluídica es una tecnología de aplicaciones semejantes a las de la electrónica, de menor velocidad que ésta, pero también útil en la industria.

## Compuerta AND

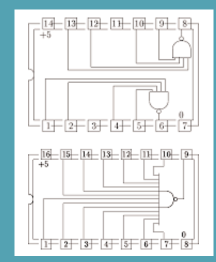


| A | B | A* B |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |



- **Circuito integrado DM7408, del fabricante Fairchild, con cuatro compuertas AND en la misma cápsula. Mide dos centímetros de largo, y se alimenta con 5 V ± 5 %.**

Como lo indica la tabla, la compuerta AND presenta una salida nula cuando la tensión en cualquiera de las entradas (o en ambas) es, también, igual a cero, y una salida máxima cuando las dos entradas reciben tensión. La conjunción A*B se lee *A* y *B*, y también se representa como A.B, AB, A×B y A^B.



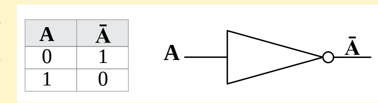
- Hay compuertas de más de dos entradas. En la figura, el circuito integrado LS20, con dos compuertas NAND de cuatro entradas cada una, y el S133, con una compuerta NAND de trece entradas.

[3] Actualmente se establece, por norma, que los circuitos lógicos se alimenten con una tensión de 5 V.

[4] Esos nombres en inglés, que se han adoptado como internacionales, son los de la conjunción copulativa *(y)* la disyuntiva *(o)*, sus negaciones, y la conjunción disyuntiva excluyente: o bien esta afirmación, o bien aquella otra; pero no ambas.

## Compuerta NOT

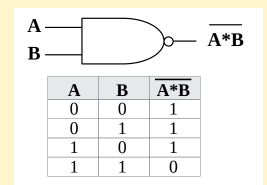
Esta compuerta, la de negación, invierte la señal lógica. Cuando a la entrada hay tensión, a la salida no la hay, y viceversa. El símbolo Ā se lee *no A*, y se escribe también como ~A, y Ã.




| A | Ā |
|---|---|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

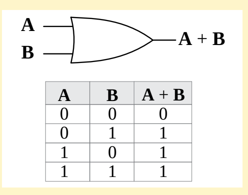
## Compuerta NAND

Es la combinación de una compuerta AND y una NOT. El único caso en que su salida vale cero, es cuando están activas las dos entradas.




| A | B | $\overline{A*B}$ |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

## Compuerta OR

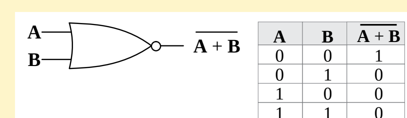



| A | B | A + B |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

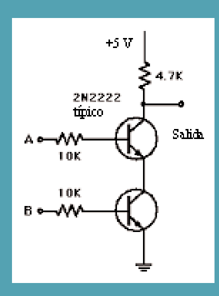
Como lo muestra su tabla lógica, o tabla de verdad, la compuerta OR, o de conjunción inclusiva, tiene su salida activa, cuando es activa al menos una de las entradas. A + B se lee A o B, y también se representa como A v B.

## Compuerta NOR

El pequeño círculo a la salida de la compuerta, representa la negación, lo mismo que la raya sobre las letras. La compuerta NOR sólo entrega salida cuando no hay ninguna entrada activa.




| A | B | $\overline{A + B}$ |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |




Compuerta NAND, hecha con dos transistores. Cuando los dos conducen al recibir corriente en sus bases, conectan la salida a tierra. En otro caso, la salida es de 5 V.

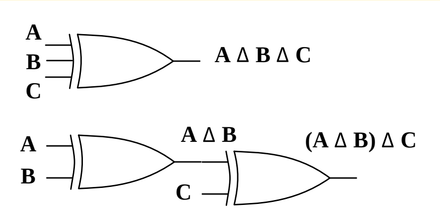
## Compuerta XOR

La X representa el carácter excluyente de la disyunción. **A Δ B** se lee o *A*, o *B*, y también se escribe A ⊕ B. La salida se activa cuando se alimenta una u otra entrada, pero no cuando están las dos ausentes, ni cuando están las dos presentes.

A
B
A Δ B

| A | B | A Δ B |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

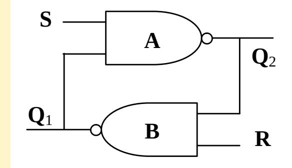
Si una compuerta XOR tiene más de una entrada, la salida es 1 cuando el número de entradas activas es impar. Para ver por qué es así, podemos interpretar la disyunción de manera asociativa: A Δ B Δ C = (A Δ B) Δ C.




| A | B | C | A Δ B Δ C |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

## • El flip-flop

El flip-flop, o multivibrador biestable, es un circuito cuyos antecedentes se remontan al siglo XIX. Cumple la misma función que el relé autoalimentado descrito en el capítulo 8, ya que su estado, además de depender de las condiciones presentes (si hay o no tensión en *R* o en *S*), también depende de su historia.



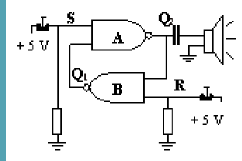

| S | R | $Q_1$ | $Q_2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | cualq. | |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | s/cambio | |

Se lo puede hacer con dos compuertas NAND, como indica la figura. En su estado normal, se mantienen alimentadas desde afuera las entradas *S* y *R*, esto es, se ponen en el estado 1. Si $Q_1$ estuviera en 1, eso significa que $Q_2$ tiene que estar en 0, y todo cuadra. Pero con el mismo argumento, si $Q_1$ estuviera en 0, entonces $Q_2$ tiene que estar en 1, y todo sería coherente también. El circuito admite, entonces, dos estados posibles y estables. Para pasar de uno al otro se debe poner a cero momentáneamente la entrada correspondiente. Por ejemplo, un cero en R fuerza un uno en $Q_1$, con lo que $Q_2$ cae a cero; entonces cuando R vuelva a su estado normal, uno, el circuito quedará en el mismo estado: $Q_1 = 1$ y $Q_2 = 0$. Si después se pone a cero momentáneamente la entrada S, aparece tensión en $Q_2$, con lo que se apaga $Q_1$. Cuando la entrada S vuelve a su valor normal, que es 1, el circuito queda en el mismo estado, $Q_1 = 0$ y $Q_2 = 1$, opuesto al anterior. Esa propiedad hace del flip-flop el circuito más sencillo capaz de almacenar información, en este caso binaria, porque equivale a un cero o un uno. La entrada *S* se llama *set*, y la *R*, *reset*; de poner y reponer, en inglés.

Almacenar o un cero o un uno se considera un *bit* de información. Ocho bits son un *byte*, también llamado *octeto*.

Para que un flip-flop responda a pulsos de tensión, y no a sus interrupciones, se lo puede diseñar con entradas inversoras, que se representan con un pequeño






• El *flip-flop* se inventó en 1928 con el nombre de *disparador de Eccles y Jordan*. Su nombre popular se empezó a usar en 1930, y significa *chancletas*, por el ruido que hace ese calzado contra el pie y el suelo, semejante al que emite un parlante conectado a la salida del circuito, cada vez que se pulsa una interrupción de entradas (el capacitor bloquea la corriente continua).

círculo de negación en el esquema. Para entradas sin invertir, el flip-flop se puede armar con compuertas NOR.

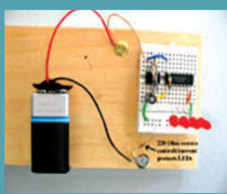


● Algunos interruptores de perilla, cuando se los acciona, hacen contacto si antes no lo hacían, y desconectan en caso opuesto, en una función conocida como *toggle*, o balanceo, la misma que cumplen los flip-flops del tipo JK.

## FLIP-FLOP CON RELOJ

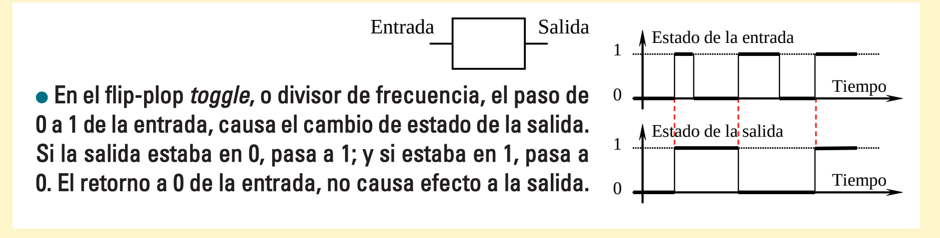
En muchas aplicaciones, relacionadas con la transmisión y procesamiento de datos, se desea que varios circuitos conmuten a la vez y no con demoras diferentes que den lugar a errores; y cada circuito no cambie de estado ante cualquier señal que le llegue por sus entradas, sino sólo si éstas arriban en el intervalo de tiempo en que les es permitido ingresar. Esos flip-flop tienen electrodos adicionales de habilitación y de reloj, en los que ingresan señales que representan el cero o el uno, (ó *L* y *H*, de *low* y *high*), de modo que el circuito sólo reacciona si las señales de entrada ingresan durante el valor alto de la señal de reloj, o de la señal de permiso, o enable.

## OTROS TIPOS DE FLIP-FLOP



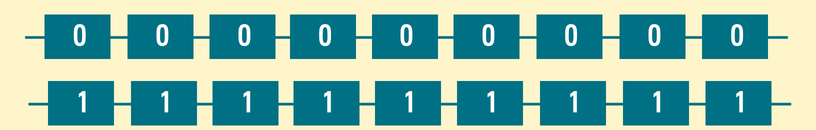
● Contador binario de cuatro bits, armado por Jorge Flores, de Lima, Perú, con una batería, un integrado 4.520, un reloj 555, un capacitor y tres resistores. Cada vez que se acciona un pulsador improvisado con una chinche y papel de aluminio, los leds indican el avance de la cuenta binaria, desde 0, con todos los leds apagados, hasta el 15, con todos encendidos. El agregado de un integrado 555, da pulsos de reloj que hacen que el contador marche solo.

Hay una gran variedad de circuitos biestables para el almacenamiento de la información: JK, SR, D, T, etcétera. Uno interesante es el flip-flop basculante, más conocido por su nombre en inglés, *toggle*, cuyo estado cambia con las señales que recibe por una sola entrada. Si está inactivo y recibe la señal, se vuelve activo; si la señal se anula, queda activo, sin cambios; si viene una nueva señal, se desactiva, y si esa señal desaparece, permanece inactivo. Por su funcionamiento, se lo llama *divisor de frecuencia*.




● **En el flip-plop *toggle*, o divisor de frecuencia, el paso de 0 a 1 de la entrada, causa el cambio de estado de la salida. Si la salida estaba en 0, pasa a 1; y si estaba en 1, pasa a 0. El retorno a 0 de la entrada, no causa efecto a la salida.**

Consideremos varios *toggles* en cadena, como muestra la figura. Si inicialmente estaban todos en 0, cuando se introduzca un 1 a la entrada del primero, el segundo conmutará a 1; eso hará que el tercero también pase a 1, y así hasta el último, como una fila de dominós.



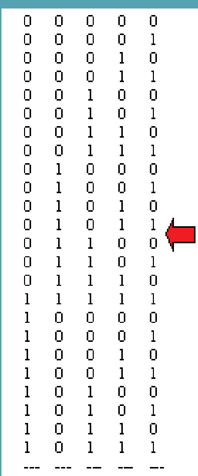
Si a continuación se conmuta varias veces la entrada del primero, cada uno de los flip-flop que siguen cambiará de estado con la mitad de la frecuencia del primero, la cuarta parte, la octava, y así sucesivamente.

Supongamos que, después de varias conmutaciones de la entrada del primer elemento, se llega a este estado:




A partir de todos los flop-flop en el estado 1, para que el primer elemento pase a 0, hay que aplicarle un pulso. Para que pase a 0 el segundo, hacen falta dos pulsos en el primero. Para que el tercer elemento pase a 0, se necesitan cuatro pulsos a la entrada del primero; y así sucesivamente. Como el séptimo está, ahora, en 0, eso significa que hubo, por lo menos, $2^6$ pulsos de entrada, o sea, 64. Además, como el quinto está en 0, hay que sumar 16; más 4 y 2, respectivamente, por el tercero y el segundo; en total, 86 pulsos positivos a la entrada del primer flip-flop. Vemos entonces en esa cadena de *toggles* una primitiva manera de contar cantidades.

En la práctica, y para que los valores significativos sean los unos y no los ceros, se usan flip-flop de entrada inversa, que conmutan cuando la entrada pasa de 1 a 0. El flip-flop de entrada es el de la derecha de la serie, para que la cifra menos significativa quede de ese lado, igual que en la numeración, donde las cifras de mayor valor son las que están más a la izquierda. Ésa es una numeración *binaria*, porque consta de sólo dos símbolos, o estados, de cada dígito, en este caso el 0 y el 1.



| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| --- | --- | -- | -- | -- |

- Una cifra binaria es como un flip-flop de entrada inversa. Cada vez que la cifra pasa de 1 a 0, obliga a la cifra de la izquierda a cambiar su valor. Por ejemplo, en el lugar señalado por la flecha, la última cifra pasó de 1 a 0, entonces la penúltima conmuta; y como lo hace de 1 a 0, la antepenúltima también conmuta; pero como lo hace de 0 a 1, ahí termina el cambio.

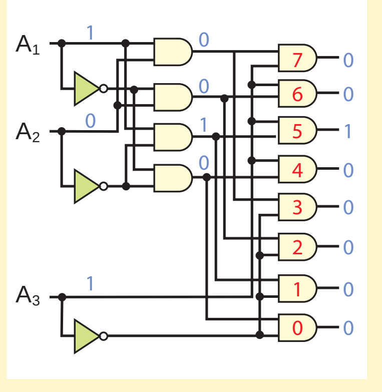
## Conversión de numeración binaria a decimal

Como vemos, es sencillo, electrónicamente, contar una cantidad de pulsos en el sistema binario de numeración, y conseguir que un flip-flop vuelva al estado inicial cada cantidad de 2, 4, 8, 16 ó 32 pulsos, o cualquier potencia entera de dos. Es algo más difícil conseguir que un circuito vuelva al estado inicial cada vez que recibe diez pulsos, que es lo que se usa para contar en base diez. Se necesita que el circuito de cada cifra admita diez estados diferentes, que podemos llamar 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 0; y hacer que cada vez que ese elemento pase del estado 9 al 0, obligue al de al lado a cambiar al estado siguiente a aquél en el que se encuentra; por ejemplo, si estaba en 4, que pase a 5; y si estaba en 9, que pase a 0.

Una de las formas de transformar un número binario en uno decimal es la de la figura, tomada de *http://logica-digital.blogspot.com*, de Armando Martínez. El circuito, con once compuertas AND y tres compuertas inversoras, convierte números binarios de tres cifras, desde el 000 hasta el 111, en un número decimal de una sola cifra, desde el 0 hasta el 7.



- Usamos numeración decimal, porque tenemos diez dedos en las manos. Sin embargo, existieron culturas que numeraban con base 6, 12, y otras, o que combinaban la numeración decimal con las de otras bases. Aún hoy, se venden huevos y facturas por docena, y no por decena, ni por kilogramo.




A pesar de su apariencia intrincada, el circuito no es difícil de interpretar. Por ejemplo, para que la compuerta 7 tenga salida, tienen que estar alimentadas sus dos entradas. Una de ellas es la tercera cifra binaria, A3. La otra entrada de la compuerta 7 es la conjunción de las cifras binarias A1 y A2. En síntesis, el binario 111 equivale al decimal 7.

Para que se active la cifra decimal 6, tiene que estar activa la entrada A3, que es la más significativa del número binario, y equivale a un 4. Y además, tiene que darse la conjunción entre A2, que vale 2, y la negación de A1, que vale 1. En resumen, 6 = 4+2, sin que intervenga el 1. En la práctica, para convertir números binarios en decimales, se usan circuitos integrados ya diseñados para esa función.

Los contadores decimales intervienen sólo en la presentación de la información a los humanos, o para recibirla de éstos. Si no fuera por la costumbre, encontraríamos que la numeración de base diez es incómoda, porque desperdicia bits; por eso, las máquinas suelen operar internamente con numeración binaria, tetral, octal, hexadecimal; y en general, con bases iguales a potencias enteras de dos. En todas esas bases de numeración, las reglas para contar son las mismas: se pasa de un dígito al siguiente, y cuando se vuelve al inicial, se hace que el dígito contiguo avance una posición.



Disposición típica de los siete segmentos de un dígito decimal, con los que se pueden representar también algunas letras. Los más antiguos, en 1940, se hacían con lámparas incandescentes o fluorescentes. Hoy, los más comunes son los de leds, o diodos luminosos, y los de cristal líquido.

## Controladores de pantallas digitales

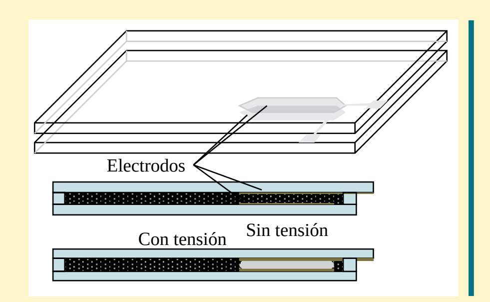


Como ejemplo de función lógica de control, veamos un detalle del manejo eléctrico de uno de los dígitos decimales de siete segmentos de una pantalla de cristal líquido (LCD).

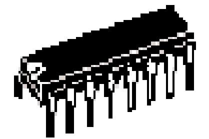
Hay varios tipos de LCD. En algunos, los segmentos encienden (o se hacen visibles) cuando se aplica tensión entre dos electrodos,[5] uno de los cuales tiene la forma del segmento, y el otro es la espalda completa de la pantalla, común a todos los segmentos.

Otros modelos de pantallas carecen de espalda común, y los trazos encienden sólo cuando se aplica tensión entre los dos electrodos que encierran el segmento, a modo de sandwich.

[5] En el capítulo 2, se explican las bases del funcionamiento de los LCD. Por razones relacionadas con la durabilidad de esa clase de pantallas, la tensión que se les aplica tiene que ser alterna, de una frecuencia del orden de las decenas de hertz; de otro modo, la sustancia del gel se descompone.

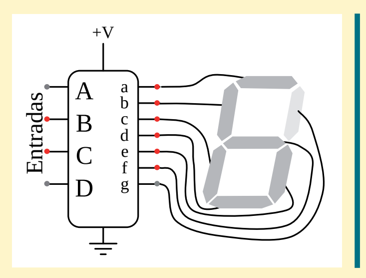



● **Segmento de un dígito de una pantalla LCD. El trazo se hace visible cuando se aplica tensión entre dos electrodos transparentes que encierran el gel. En algunos casos, el electrodo de abajo ocupa toda el área, y es común a todos los trazos. En otros, como éste, cada trazo tiene electrodos independientes.**



● Controlador de pantalla de cristal líquido de dígitos de siete segmentos, modelo M74HC4543, fabricado por ST Microelectronics. Opera con una tensión comprendida entre 2 y 6 Vcc, aplicada entre la pata 16, y la 8 de tierra. Hay que aplicarle una tensión alterna de onda cuadrada a la pata 6, que es la que enciende los segmentos de la pantalla.

Aunque con motivos de estudio, o como hobby, podemos construir una pantalla digital numérica, con las compuertas necesarias, la industria ya provee circuitos integrados, simples y múltiples, que se ocupan de transformar las señales binarias, o decimales, en las necesarias para que en los LCD se enciendan los segmentos adecuados, ante cada cantidad de entrada. Esos circuitos se conocen como controladores, y más aun por su nombre en inglés, *drivers*. Sigue un ejemplo de controlador para pantalla LCD de reverso común.[6]



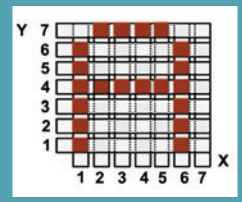

● **Para cada combinación de dígitos binarios en las cuatro entradas, A, B, C y D, el controlador provee salidas adecuadas para el encendido de los segmentos correspondientes del dígito decimal (para evitar cruces de conexiones que pudieran confundir, alteramos el nombre habitual de las salidas).**

| D | C | B | A | a | b | c | d | e | f | g | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 5 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 6 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 7 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 8 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 9 |

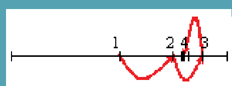
Por ejemplo, si en A, B, C y D se introducen, respectivamente, las señales 0, 1, 1, 0 (como se muestra en colores), entonces se activan las salidas a, b, c, d, e y f, y permanece inactiva g. Con eso, se genera el número 6 en la pantalla.

Si en vez de tratarse de una pantalla de cristal líquido de espalda común, fuera una de segmentos de dos electrodos independientes cada uno, habría dos caminos para controlarla. Uno, obvio, es conectar la mitad de los electrodos entre sí, para convertirlos en uno común, y dejar independientes los restantes, con lo que se puede usar el mismo controlador que acabamos de ver. Pero hay otra manera de manejar los segmentos, que emplea un controlador más sencillo y barato, y que justifica esa clase de pantallas.

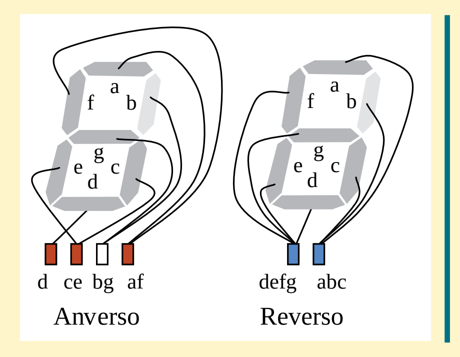
[6] En realidad, las salidas a, b, c, d, e, f y g comandan compuertas que alimentan el LCD con corriente alterna; por simplicidad, omitimos representarlas (para comprender la lógica digital, supongamos que la pantalla es de leds, que funcionan con corriente continua).




Para componer letras o símbolos complejos, la cantidad de segmentos necesarios sería demasiado grande; se prefiere entonces una matriz de puntos. En la figura, la letra A se consigue al alimentar cada uno de sus veinte puntos (por ejemplo, el $x_3$, $y_4$, todos a la vez, o uno a continuación de otro, en rápida secuencia.




Si al buscar una palabra en el diccionario, recorriéramos la lista desde su inicio, tardaríamos mucho en hallarla. En cambio, si abrimos el libro por el medio, descartamos la mitad que no contiene el dato, y repetimos ese procedimiento con la otra mitad, y así de seguido, la búsqueda será muy breve. Ese método se conoce como *dicotomía*, y lo emplean algunos convertidores analógicos digitales para comparar tensiones.
En un diccionario de $2^{10}$ = 1.024 hojas, hay que buscar a lo sumo diez veces. Y con sólo diez comparaciones, se puede medir una tensión con una precisión de una parte en mil (dicotomía significa cortar por la mitad).




**Los electrodos del frente del LCD se agrupan como indica la parte de la izquierda de la figura, y los de atrás, como se muestra a la derecha. Entonces, por ejemplo, cuando se aplique un polo de la tensión al primero, segundo y cuarto electrodo del anverso, y el otro polo a los dos electrodos del reverso, como se indica en colores, encenderá el dígito 6.**

Con este tipo de controlador se ahorra una salida, puesto que el anterior tiene siete, y éste seis. Pero su principal ventaja no es ésa, sino que facilita el manejo de pantallas con varios dígitos, que es el caso más común.

## Conversión analógico digital

El código Gray es un ejemplo de conversión analógico digital, en la que una variable continua, como una traslación, o un giro, se traduce en el cambio de estado de los sensores que detectan las líneas claras y oscuras de una banda, o de un disco. Pero ¿cómo traducir automáticamente, a números, una temperatura, una velocidad, o un tiempo? En los tiempos actuales, las técnicas digitales se apoyan casi exclusivamente en la electrónica. Para convertir una magnitud continua en un número, se la transforma previamente en una tensión eléctrica, de modo que el problema se reduce a cómo convertir esa tensión, en información digital.

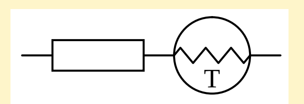
Los métodos primitivos se basaban en la acumulación de cargas eléctricas iguales[7] en un capacitor, hasta que la tensión del capacitor igualaba la tensión que se quería digitalizar, condición que se determinaba con la ayuda de un amplificador operacional en la conexión como comparador. Igualadas ambas tensiones, se contaba el número de cargas parciales que recibió el capacitor, y se multiplicaba eso por $C.Q$, donde $C$ es la capacitancia, en farad, y $Q$ la carga, en coulomb.

Como ese método es lento, y por eso inaceptable para muchas aplicaciones, y como la tecnología actual ofrece componentes de tamaño minúsculo, de los que entran centenares de miles en una sola cápsula de circuito integrado, actualmente se prefieren otros métodos, basados en la comparación sucesiva de la tensión incógnita, con la que proviene de una cantidad suficiente de tensiones de referencia.

[7] Si tenemos en cuenta que $Q = I.t$, para obtener cargas eléctricas iguales, se hacen circular corrientes iguales, durante tiempos iguales. Para conseguir una corriente constante, se la hace circular a través de un resistor, cuya caída de tensión se compara con la de un diodo Zener. Los tiempos iguales se pueden conseguir con las oscilaciones de un cristal de cuarzo.

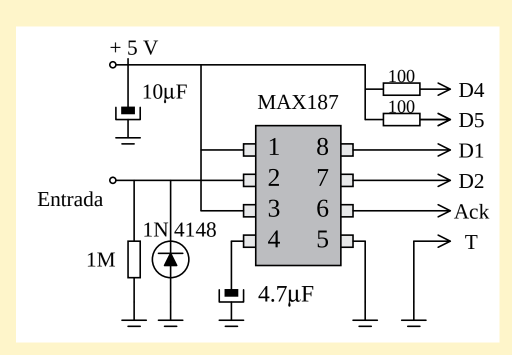
# • Ejemplo de aplicación de un convertidor A-D

Para medir una temperatura, convertir esa medición en una salida digital, e ingresar los datos a una computadora (para registro, o para alguna acción automática), se puede usar un circuito sencillo con un *termistor*, o resistor variable con la temperatura, en serie con un resistor fijo. Cuando se alimenta la serie con una tensión constante, la tensión entre los extremos de cualquiera de esos dos componentes, varía con la temperatura.




La tensión para alimentar la serie se puede extraer de la misma computadora, como lo muestra el circuito que sigue, o bien de una batería independiente.

El circuito de la figura emplea un convertidor analógico digital MAX187 de Motorola, de 5 V de alimentación y 12 bits. Eso significa que puede distinguir entre $2^{12}$, ó 4.096 valores diferentes de tensión, entre 0 y 5 V, lo que arroja una precisión máxima teórica de una parte en cuatro mil, el 0,025 %, ó 1,25 mV.




Los componentes son tan pequeños, que caben en la ficha macho DB25, de 25 patas, de un cordón de puerto paralelo de computadora, el mismo que se usa para enchufar una impresora.

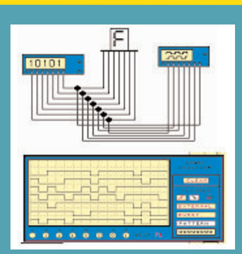
Con un programa de computación (que no tratamos aquí) que envíe datos al puerto paralelo, se consigue que aparezca un 1 en los bits 4 y 5 del puerto. En ese instante, el circuito integrado digitaliza la señal eléctrica que recibe por la entrada; esto es, presenta datos cero y uno en sus salidas, equivalentes a tensiones de 0 y 5 V, respectivamente. El programa de la computadora debe poner en nivel bajo la pata 7 del integrado (a través del contacto D2 de la ficha del puerto), para que el integrado reciba, con eso, la orden de selección. Después se envían, con el programa, 12 pulsos de reloj a la pata 8 del integrado, a través de la pata D1 de la ficha. Por cada uno de esos doce bits de reloj, el integrado devuelve un bit, 0 ó 1, a través de su pata 6. Esa secuencia comienza a partir del bit menos significativo, y finaliza en el de mayor valor. Los valores de salida del integrado los lee, así, la computadora, y los convierte, si queremos, en un número binario de doce cifras, o en uno decimal equivalente, de cuatro cifras.



• Ficha macho DB25 para puerto paralelo. Los números de las patas están moldeados en el plástico. La 10 es la señalada como Ack en el circuito, y desde la 18 hasta la 25, están todas a tierra; T en el circuito. Los puertos *paralelo* son los que reciben datos por varios contactos a la vez; los puertos serie, en cambio, los aceptan por una sola entrada de dos contactos.

$$R = \frac{V_0}{2^{n-1}}$$

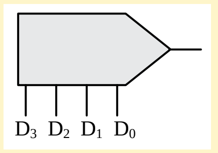
• La resolución de un convertidor está dada por la fórmula de arriba, donde R es la resolución, en volt, $V_0$ es la tensión máxima; y n, el número de bits. Por ejemplo, con un convertidor de dos bits, la resolución es de la mitad de la tensión máxima, o lo que es lo mismo, del cincuenta por ciento. la resolución es la mínima variación de la entrada, capaz de producir algún cambio. Se relaciona con la precisión del convertidor.

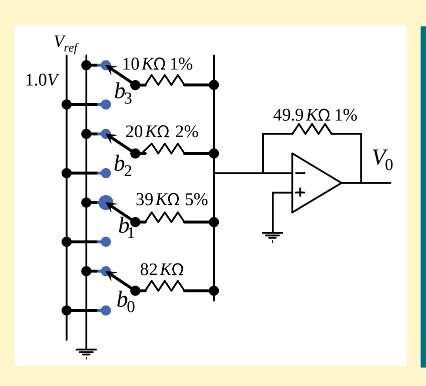



Circuito digital simulado con el Electronic Workbench de 1991. Un graficador virtual permite analizar cómo conmutan sus diferentes compuertas. Aunque no ofrece tantas posibilidades de aprendizaje como la conexión de componentes verdaderos, igualmente es útil para estudiar variantes de proyectos.

## Conversión digital analógica

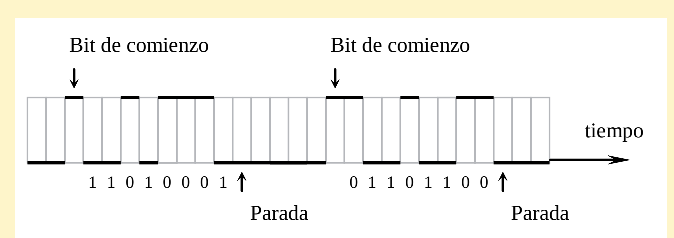
A veces se necesita la función recíproca de la conversión analógica digital, por ejemplo, cuando se digitaliza un sonido, y después se lo reconstruye a partir de los datos numéricos.




**Convertidor digital analógico de cuatro bits. La resistencia de entrada cambia según cuáles bits estén conectados a la tensión de referencia; y con ella, se modifica el factor de amplificación. El bit más significativo es el de arriba, que introduce una ganancia doble que el inmediato inferior; cuádruple de la que corresponde al bit que sigue hacia abajo, y ocho veces mayor que la del último bit. El puerto de entrada, en este caso, es paralelo.**

La comunicación de datos en paralelo no deja dudas, por la posición de entrada, cuál es el bit más significativo, cuál es el de menos valor, y cuáles los intermedios. Pero en la comunicación en serie, el dispositivo receptor debe recibir una señal que le indique cuándo comienza el primer bit, y cuándo fue el último de cada carácter transmitido.



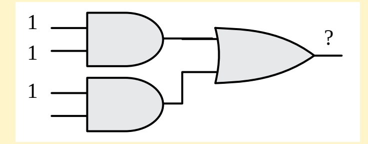

La figura muestra un ejemplo de transmisión de datos en serie. Se transfirieron, en un tiempo de pocas millonésimas de segundo, los números binarios 11010001 y 01101100. Los últimos dígitos valen 1; los penúltimos, 2; los antepenúltimos, 4; etcétera; y los primeros dígitos de cada grupo de ocho, valen 256. Esos binarios equivalen a los decimales 216 y 418, que pueden servir, cada uno, para representar una letra, o un carácter especial.

## Propuestas de estudio

**17.1.** Escriban cuatro listas; una de números binarios, otra de tetrales, otra de octales, y una cuarta de hexadecimales; todas a partir del cero, y hasta el equivalente

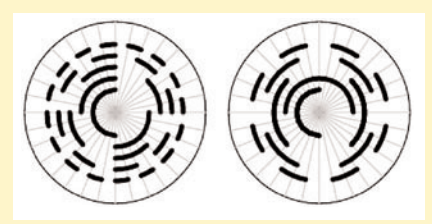
decimal de 20 (la utilidad de esa práctica es la de comprender mejor el funcionamiento de algunos circuitos lógicos usados en la transmisión de datos).

**17.2.** ¿Qué valor lógico tiene la salida de la compuerta indicada con un signo de interrogación?




**17.3.** Diseñen un flip-flop con dos compuertas NOR, y expliquen su funcionamiento.

**17.4.** Uno de los codificadores de posición angular de la figura usa un código binario secuencial, en el que los números binarios se presentan en orden creciente. El otro, en cambio, responde al código Gray. ¿Cuál es cada uno?



**17.5.** ¿Qué signo enciende en una pantalla con dígitos de siete segmentos si, con las barras agrupadas en el anverso y el reverso como se muestra en la página 214, se aplica un polo de la fuente de tensión al grupo abc del anverso, y el otro polo a los grupos ce, bg y af?

## Otras fuentes de estudio e información

- Volvemos a mencionar *http://www.pablin.com.ar*, de Pablo Canello, que contiene muchos ejemplos apropiados para el estudiante y el aficionado, entre ellos muchas aplicaciones digitales de variado nivel. En ese sitio hemos consultado el ejemplo de convertidor de uso general, para entrada a computadora.
- En *http://www.todorobot.com.ar/proyectos/paralelo/paralelo.htm*, hay un programa Visual Basic, compilado como ejecutable exe, para escribir y leer el puerto paralelo de una computadora, con explicaciones en castellano.
- En *http://www.electronica2000.com/digital/cirlogse.htm* hay un curso de nivel intermedio de electrónica digital, y sus fundamentos. Es de autores varios.
- El sencillo software Electronic Workbench, en su versión 2ª de sólo medio megabyte, mencionado en el capítulo 16, permite simular circuitos digitales, entre sus herramientas virtuales hay relojes, generadores de pulsos, dígitos de siete segmentos y generadores de palabras, o combinaciones de dígitos.

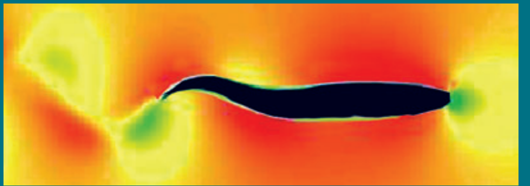
ELECTRÓNICA

Capítulo 18

# Nuevos materiales y sus aplicaciones

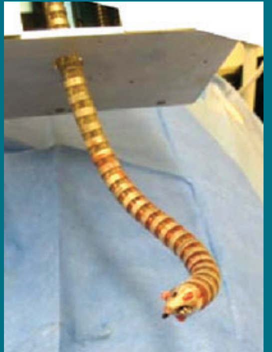


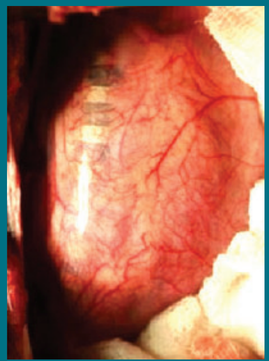
Dirigible de plástico inflado con helio, desarrollado por EMPA (*Eidgenossische Materials Prufungs Anstalt,* Instituto Federal Suizo de Ensayos de Materiales).
El aparato nada en el aire como un pez en el agua, gracias a que su envoltura cambia de forma cuando se le aplica electricidad; sin embargo, la cabina de pasajeros se desplaza sin oscilaciones.

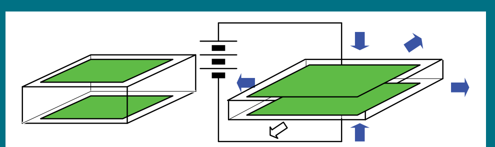


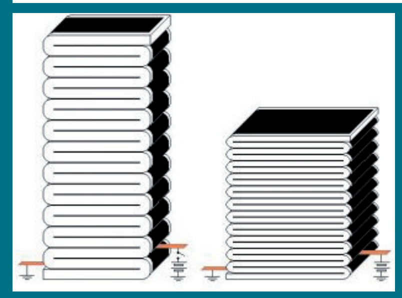
La nave es silenciosa, genera poca turbulencia, y gasta menos energía que una de hélice o de turbina. A la izquierda, simulación de computadora, que representa la presión del aire en las inmediaciones del dirigible ondulante.

Con los *elastómeros electroactivos* –así se llaman esos materiales– se hacen también parlantes, músculos artificiales, y serpientes robóticas que examinan, limpian y reparan tuberías, y ayudan en la cirugía cardiovascular.







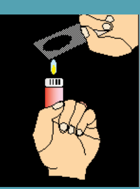


Elastómero blando, encerrado entre dos placas conductoras de metal delgado y flexible. Cuando se les aplica tensión, las placas se atraen, y la goma se comprime. Si se pliega el conjunto como en la figura, se obtiene un músculo artificial, para aplicaciones industriales y médicas.

# Nuevos materiales y sus aplicaciones[1]



- Si se aprieta y se afloja repetidas veces una pantalla de cristal líquido entre los dedos, el gel fluye, y sus partículas se ordenan parcialmente; entonces alteran la polarización de la luz que las atraviesa, y se produce un efecto de colores móviles, que perdura mientras el gel se encuentre en movimiento.



- Por arriba de los 60 ó 70 grados, las pantallas de cristal líquido se ennegrecen, y cuando se enfrían, vuelven a la normalidad. Eso se ve a veces cuando se deja un reloj expuesto al sol en verano, ya sea al aire, o en un coche con las ventanillas cerradas. El efecto se debe al desorden de las moléculas cuando la temperatura es elevada.

Hasta hace poco más de un siglo, la ciencia y la tecnología se basaban en el hallazgo de materiales naturales, y la observación y aprovechamiento de sus propiedades útiles. Hoy, el mayor conocimiento de la estructura de la materia inorgánica y orgánica, permite, en muchos casos, invertir ese proceso, y generar artificialmente, a partir de las necesidades, materiales que no existían. Las plantas medicinales se reemplazan, o se complementan, con medicamentos sintéticos; a los vegetales y animales para la alimentación se agregan variedades modificadas genéticamente, y creadas especialmente para resistir herbicidas, la sequía y enfermedades; y a los clásicos conductores metálicos, y a los aislantes vegetales y minerales, hoy se suman superconductores cerámicos, semiconductores, polímeros de muy elevada resistividad, y una variedad muy grande y creciente de materiales de propiedades útiles, y hechos a la medida de aplicaciones electrónicas. Este capítulo trata algunos ejemplos.

## Cristales líquidos

En el capítulo 2 se describió el principio de funcionamiento de una pantalla de cristal líquido, que consiste en el giro del plano en el que oscilan las ondas de luz, cuando la aplicación de electricidad orienta las moléculas alargadas de un gel.

Un cristal es un sólido cuyos átomos están regularmente ordenados, y en posiciones aproximadamente fijas entre sí; esto es: los átomos vibran y oscilan, pero no se apartan a gran distancia del lugar primitivo que ocupaba cada uno, y cada átomo tiene siempre los mismos vecinos. En un líquido, en cambio, los átomos no presentan un orden regular y, además, cada uno puede apartarse considera-blemente de su posición inicial, se revuelva o no el líquido.[2]

Hablar de un cristal líquido parece, entonces, una contradicción. Sin embargo, reciben ese nombre materias cuyas partículas pueden ordenarse como las de un

[1] La palabra nuevo pierde rápidamente su significado, como en las llamadas *NTIC* (nuevas tecnologías de la información y la comunicación), que tienen ya treinta años.

[2] Ese efecto se conoce como *difusión*, y obedece a los movimientos de las partículas, que sólo estarían quietas a la temperatura de cero grado absoluto. Si se echa una cucharada de miel en un vaso con agua, la miel se va al fondo; pero después de algunas semanas se distribuye uniformemente en todo el volumen; y eso ocurre aunque los líquidos se mantengan quietos.

cristal; pero su estado es blando, como el de una gelatina diluida, intermedio entre el sólido y el líquido.

Los cristales líquidos se conocen desde hace más de un siglo, y los primeros que se estudiaron fueron los del colesterol, una familia de sustancias químicas insolubles en agua, que participan de la estructura de algunas proteínas. En 1940 se usaron como válvulas de luz; desde 1970 se popularizaron en las conocidas pantallas de números y signos de relojes, y otros aparatos electrónicos; y hoy en las pantallas en colores de televisores, monitores y celulares.

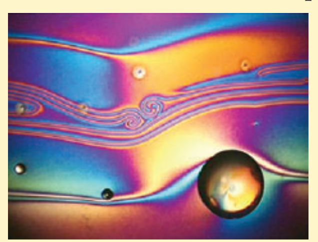
Hay otras aplicaciones de los cristales líquidos, aparte de la indicación de dígitos o símbolos, y la formación de imágenes en pantallas. Cuando se suelda con arco eléctrico, el operador o la operadora debe alzar la máscara para ver dónde apoya el electrodo, y cubrir su rostro con ella antes de hacer contacto, para no sufrir el deslumbramiento de la chispa eléctrica. Parte de esa maniobra la realiza, entonces, a ciegas. Con una máscara de cristal líquido comandada por un circuito que recibe, a través de un fototransistor o fotodiodo, la luz del arco de la soldadura, la persona que suelda puede ver con toda claridad dónde hace contacto. Cuando se establece el arco, el sensor de luz envía de inmediato una señal.



**Máscara de soldadura con auto oscurecimiento.**

El cristal líquido se oscurece al instante, sin que quien suelda deba siquiera parpadear. A partir de ese momento, la persona suelda bajo la luz del propio arco, mucho más intensa que la del ambiente, pero ahora filtrada. Eso reduce el riesgo de daños visuales, y el de recibir ascuas en pleno rostro; mejora la calidad del trabajo, y ahorra tiempo.

Otra aplicación de los cristales líquidos es su uso como estroboscopios.[3] Si se mira el funcionamiento de una máquina rotativa a través de un filtro de cristal líquido alimentado con corriente alterna de onda cuadrada del mismo período que el de rotación de la máquina, se la verá quieta; y si hay una pequeña diferencia entre la frecuencia de la tensión que excita el cristal líquido, y la frecuencia de rotación de la máquina, se la verá en cámara lenta, hacia adelante o hacia atrás, efecto útil para diagnóstico de fallas, para afinar el encendido de los motores de explosión, o para balancear las ruedas de los automóviles.



**Cristal líquido, arte fotográfico de Karen Neill. El gel se orientó con electricidad; después se interrumpió la alimentación, y se desplazaron los vidrios que encierran el gel, para peinar las moléculas en diferentes direcciones. El empleo de luz polarizada muestra la orientación de las moléculas; iguales en las regiones del mismo color. Los círculos son burbujas de aire.**

[3] En griego, *estro* es período (el estrógeno es una hormona que desencadena el estro, o período, en las hembras de los mamíferos). Estroboscopio significa, entonces, aparato para visualizar fenómenos periódicos.



Imagen estroboscopica, obtenida con una cámara que gira, cuyo obturador permanece abierto uno o dos segundos, tiempo en que se ilumina la escena con unos veinte destellos de luz.




Una pantalla común de cristal líquido se arruina, si se le aplica tensión continua durante mucho tiempo. Si a pesar de eso se le dan, por ejemplo, 9 V en serie con la resistencia de los dedos de la mano, y se quita esa tensión, la pantalla queda con los segmentos marcados durante varios segundos, y después se apagan. En cambio, las pantallas biestables quedan con su indicación permanente, hasta que se les aplique una tensión inversa adecuada. La pantalla de la figura se dejó de alimentar cinco segundos antes de la foto.

## Cristales líquidos biestables

Las pantallas de cristal líquido más comunes, aunque consumen poco, y mucho menos que las de leds y de plasma, gastan algo de energía. Por eso, la pila de un reloj dura sólo dos años; y a veces, mucho menos. La energía gastada es la necesaria para orientar las moléculas alargadas del gel cada vez que se aplica tensión entre dos electrodos. Cuando se deja de aplicar tensión, los trazos desaparecen, porque las moléculas del gel se desordenan, por sus movimientos térmicos.[4] Así entonces, un reloj de LCD gasta energía eléctrica, aun cuando los números de su pantalla permanezcan sin cambio. Eso obedece a que, por protección, los segmentos se excitan con tensión alterna, y requiere un cierto trabajo alinear periódicamente, muchas veces por segundo, las moléculas del gel en sentidos opuestos.

Sin embargo, hay geles que se pueden excitar con tensión continua, sin que se dañen ni se gasten, y que tienen además la ventaja de que sus moléculas conservan su posición durante mucho tiempo, gracias a una mayor viscosidad; así mantienen la información almacenada en la pantalla, sin gasto de energía. Cuando se cambian los datos, entonces sí se utiliza energía, pero en cantidad insignificante, frente a la que demandan las lcd comunes, puesto que alcanza con un solo pulso de tensión para encender o apagar un trazo.[5]



- Hay ventanas y anteojos de cristal líquido, con sensores de luz que actúan sobre un circuito eléctrico que controla la transparencia del vidrio; mayor cuando hay poca luz, y menor cuando la claridad es demasiado intensa. Su respuesta a los cambios de iluminación es instantánea, y no demorada, como en los anteojos fotosensibles a la radiación ultravioleta.

## Cambio de color del gel con la temperatura

La orientación espacial de las moléculas alargadas o achatadas de los geles electroópticos es sensible a los campos eléctricos, y constituye la base del funcionamiento de las lcd. Pero a cierta temperatura, que no es muy alta, las moléculas se desordenan, y se orientan al azar, haya o no campo eléctrico. Ese hecho, que resulta un inconveniente, porque limita la temperatura





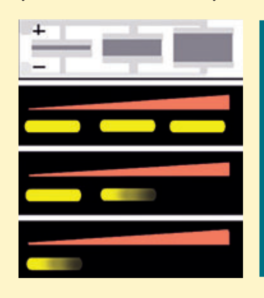


[4] La temperatura se corresponde con el grado de agitación de las moléculas. A cero grado absoluto (273,16 grados Celsius bajo cero) las moléculas están teóricamente inmóviles; y a otras temperaturas, sus velocidades son tales, que sus energías cinéticas ($\frac{1}{2}\, m\, v^2$, donde $m$ es la masa de la molécula, y $v$ su velocidad) son del orden del producto de la constante de Boltzmann por la temperatura absoluta. Esa constante vale $1{,}3806503 \times 10^{-23}$ m$^2$ kg s$^{-2}$ K$^{-1}$.

[5] La energía que consume una pantalla de cristal líquido es tan pequeña, que su genera-ción carece por completo de importancia económica; porque se mediría en millonésimas de centavo por día. La ventaja de las pantallas de cristal líquido biestable es que, cuando utilizan pilas, éstas son de muy pequeño tamaño, o inexistentes, si se aprovecha la luz ambiental para generar electricidad. El fin de la reducción del consumo de energía es, en este caso, disminuir el tamaño, el costo y el mantenimiento de los aparatos, y también la cantidad de desechos.

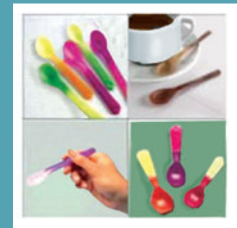
de trabajo, se aprovecha como ventaja para hacer cintas termométricas reversibles, conocidas también como tiras de frente, o tiras de fiebre. Hay variantes adecuadas para la medición de la temperatura ambiental, de heladeras, y de congeladores.

Aparte de los geles y sus aplicaciones electrónicas, hay también pigmentos sensibles a la temperatura, tanto reversibles como de uso por única vez. Algunas pilas y baterías se venden con un indicador de su estado de carga, que consiste en un papel con tres rectángulos impresos de pintura semiconductora de un lado, y una sustancia termocrómica del otro, que vira del negro al amarillo cuando supera cierta temperatura. Cuando la pila está en buen estado, su tensión alcanza para calentar los tres resistores; y cuando está muy descargada, sólo se colorea una de las figuras, o ninguna.




**Arriba, reverso del indicador. El rectángulo de más alto es el de más resistencia, y necesita una mayor tensión para alcanzar determinada temperatura. La batería se conecta entre + y –. Más abajo, el anverso, para diferentes estados.**

La sustancia sensible a la temperatura cambia de negro a amarillo cuando se la calienta, y se oscurece cuando se enfría. La temperatura de virado ronda los 70°C. Para que funcione aunque el día sea muy frío y haya viento, el indicador suele estar cubierto con una lámina de plástico que encierra un pequeño espesor de aire aislante intermedio. En algunas pilas el medidor está incorporado, y sólo hay que apretar un punto blanco para activarlo. A veces falsifican este tipo de indicador; lo sabemos al apretar el punto fuertemente y con insistencia, sin ningún resultado, hasta descubrir que es sólo un dibujo.



Arriba: cucharitas que cambian de color con la temperatura, para evitar quemaduras sorpresivas cuando se toman líquidos muy calientes.
Abajo, tira autoadhesiva, cuya advertencia aparece sólo cuando se superan los 70 grados centígrados. Se suele poner en los disipadores térmicos de equipos electrónicos (lo que parece un oso, es una mano que toca un objeto caliente).




## Papel electrónico

La tecnología de corriente nula de los cristales líquidos biestables (aunque la intensidad de la corriente valga cero sólo mientras la imagen permanece fija), cuando se aplica a la obtención de pantallas muy delgadas y de material flexible, se relaciona con el llamado *papel electrónico* (e-paper, o *papel-e*) cuyo desarrollo está todavía en fase experimental. La idea es poder escribir, mediante teclado, ratón, o al tacto con el dedo o un estilo,[6] y borrar después lo escrito si queremos, sin

[6] El estilo es un objeto punzante con el que antiguamente se escribía sobre tablillas de madera clara pintadas con cera negra, o sobre barro que después se ponía a secar, y si era importante, se horneaba. En algunos países todavía llaman *encerado* al pizarrón (la pizarra es un mineral negro que se encuentra en lajas, y que se usaba, enmarcado, en madera para escribir con tiza). Metafóricamente, el *estilo* de alguien es su forma particular de escribir, o de hacer cualquier otra cosa.

gastar papel, para disminuir la cantidad de residuos, y la demanda de fibra vegetal proveniente de bosques.



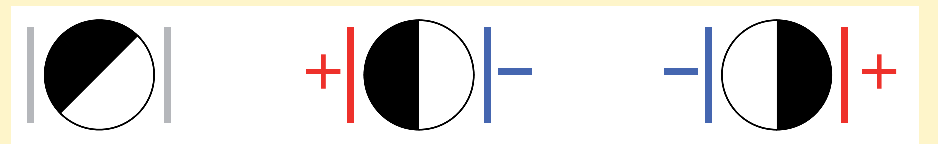
Reloj electrónico combinado con tarjeta de embarque de aeropuerto, elaborado con papel electrónico flexible.
Los pasajeros los devuelven a bordo; entonces se los puede marcar con nuevos códigos, para usarlos otra vez sin gastar papel. (Diseño experimental de Jacky Wu, Neo Chen y Eric Liuha).



**Lo que parece una hoja de papel impresa guardada en un sobre transparente, es un papel electrónico, que se puede borrar y volver a escribir indefinidamente.**

Hay varias clases de papel electrónico en experimentación, y sus principios de funcionamiento dependen de la aplicación; si se desea o no que se imprima a distancia; si el lector tiene o no permiso para escribir; si se quiere escribir o dibujar a mano, o con teclado, etcétera. Pero en todos los casos se necesitan pixeles[7] biestables.

Una de las tecnologías de papel electrónico, desarrollada en 1975 por Nick Sheridon, de la Xerox, utiliza esferas microscópicas, en emulsión en un líquido viscoso. Cada pequeña esfera es blanca de un lado, y negra del opuesto, y de polaridades enfrentadas.




**Esferas bicolores microscópicas para papel electrónico. Según la polaridad del campo eléctrico que se aplique, las esferas se dan vuelta, y mudan el color aparente.**



Reloj de pared de tres milímetros de espesor y un kilogramo y medio de peso, presentado por Citizen Watch Co. Ltd. en la Eco-Prducts 2005, Tokio.
Una aplicación quizá más útil es la de indicar, en los frentes de los ómnibus, el número de la línea, su recorrido, y la cantidad de asientos libres, entre otros datos que convenga actualizar. La flexibilidad de la pantalla contribuye a absor-ber golpes y vibraciones.

Para evitar que ese papel se borre con la electricidad estática del ambiente o del cuerpo, se lo cubre de ambos lados con una lámina conductora y transparente.

Aunque la tecnología predominante en el papel electrónico es, hoy, la de los cristales líquidos, se está experimentando con variantes, entre ellas la de los materiales magnéticos que cambian de color, o de posición, cuando se los orienta desde afuera.

La posibilidad de escribir y borrar de manera sencilla, y manejar así la información, es una importante meta tecnológica, porque hoy es la época de mayor volumen de escritura, lectura y gasto de papel.

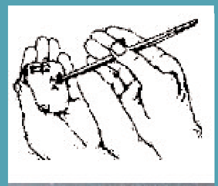
Algunas de las soluciones actuales para el registro visual de la información,

[7] Pixel significa elemento de imagen (del inglés, y fonéticamente, *picture element*).

guardan, en lo esencial, semejanza con formas primitivas de escritura, aunque difieran, naturalmente, en la velocidad, el tamaño del soporte, en la posibilidad de transferencia de datos y en la facilidad de empleo. No sabemos si la búsqueda de formas de registro de datos está ya alojada o no en nuestro genoma, pero sí se observa que el escribir y borrar fácilmente atrajo siempre a niños y adultos.



**Pizarra magnética. El imán levanta partículas oscuras sumergidas en un líquido blanco y espeso. Para borrar, se desliza un imán por atrás. El juguete es una variante de uno más antiguo, la *pizarra mágica*, en la que un papel manteca se adhería a un fondo oscuro pegajoso, del que se despegaba, para borrar, con una tirilla deslizante.**

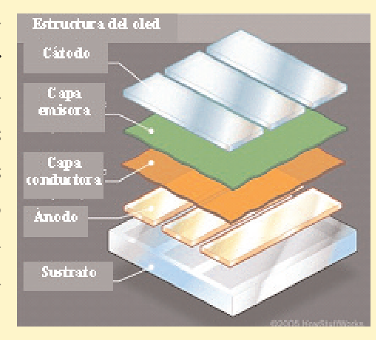




Tablilla sumeria de 2300 aC, escrita con estilo sobre barro. Los escolares, para borrar y empezar un nuevo ejercicio, simplemente amasaban el barro, y lo alisaban. Lo mismo se pretende con el e paper, pero con la posibilidad de transferir la información a varios miles de caracteres por segundo.

## Diodos orgánicos emisores de luz

La electroluminiscencia de los materiales orgánicos se observó un poco antes de 1960, en cristales de antraceno, una sustancia química compuesta por tres anillos bencénicos unidos linealmente. Sin embargo, los materiales orgánicos con propiedades luminosas más marcadas y útiles se inventaron, o descubrieron,[8] cerca de 1990. Su empleo en aparatos electrónicos se empezó a difundir ya entrado el siglo actual.




Las aplicaciones de mayor alcance se relacionan con la comunicación y la información, por ejemplo en la fabricación de pantallas de computadoras y celulares. La vida media de los nuevos oleds, aunque es bastante menor que la de los leds inorgánicos, ya supera las cien mil horas, o diez años, tiempo muy razonable, en comparación con el que posiblemente dure el aprovechamiento del equipo al que pertenecen.

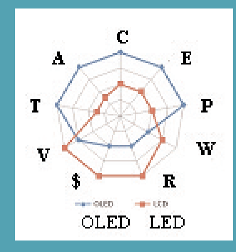
Se aplican también en paneles de iluminación suave ambiental, en reemplazo de focos de luz brillante, para que no produzcan sombras.

Los oleds permiten la construcción de pantallas de TV y monitores tan delgadas, que se las puede colgar de la pared como si fueran cuadros. Su espesor es de

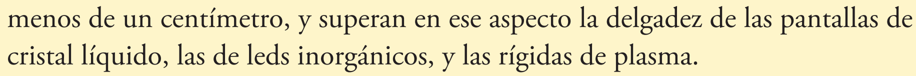


Molécula de antraceno, uno de los primeros materiales orgánicos de los que se supo que emiten luz cuando se les aplica electricidad. La molécula de ese hidrocarburo tiene catorce átomos de carbono, ubicados en los vértices de los hexágonos, y diez de hidrógeno, en los vértices que no se comparten (en griego, ántrax significa carbón).

[8] A medida que avanzan la ciencia y la tecnología, es más difícil distinguir un descubrimiento de una invención. Cuando hay muchas personas que trabajan en un campo, aumenta considerablemente la probabilidad de descubrimientos en apariencia azarosos, pero que los planificadores y administradores de recursos esperan. Los oleds se descubrieron como una variante de los polímeros conductores, y uno de los primeros de estos materiales lo obtuvo por casualidad un estudiante que trabajaba con Hideki Shirakawa, Premio Nobel de Química, del Instituto de Ciencias de Materiales de la Universidad de Tsukuba, en el Japón. El estudiante había confundido miligramos con gramos al hacer un preparado químico. Naturalmente, el resultado de esa casualidad tuvo trascendencia gracias a que se produjo en un ambiente científico y técnico muy desarrollado.

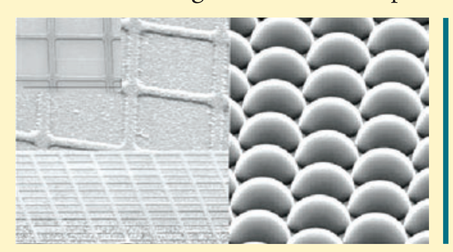



Ventajas comparativas entre leds y oleds. $: baratura; V: vida; T: velocidad de respuesta; A: ángulo de visión, C: contraste; E: delgadez; P: liviandad; W: economía de energía; R: resolución.



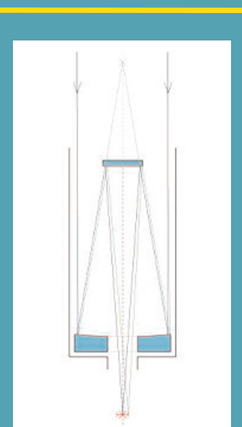
menos de un centímetro, y superan en ese aspecto la delgadez de las pantallas de cristal líquido, las de leds inorgánicos, y las rígidas de plasma.

Esto que parece un lujo, es en realidad una necesidad, porque además de economizar energía,[9] las pantallas de oleds ahorran espacio, cada vez más escaso en las ciudades de gran densidad de población.



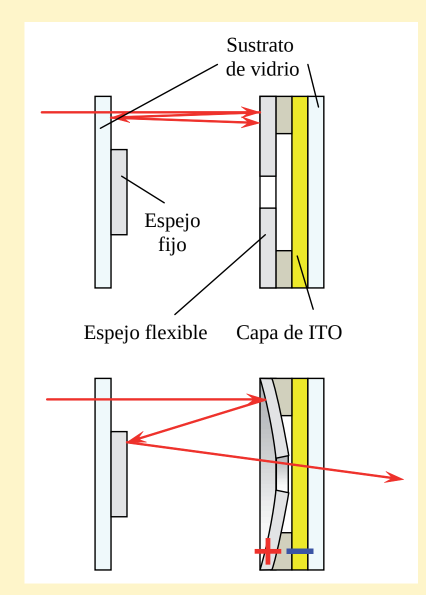
**Panel luminoso de oled, desarrollado por la Universidad de Michigan, visto con microscopio electrónico. Las esferas, de cinco micrones de diámetro, actúan como lentes que dirigen hacia adelante la luz generada por la grilla posterior.**

## Vidrios con ITO, y válvulas de luz para pixeles telescópicos



Esquema de rayos de un telescopio de Newton. La luz de la estrella incide en un espejo cóncavo que la desvía; la luz se refleja en un espejo plano, y forma una imagen real, que se puede ver con un ocular, que no está representado. La semejanza de su diseño con el de las válvulas de luz de espejos flexibles, sugirió, para éstas, el nombre de *pixeles telescópicos*.

El ITO, en inglés óxido de indio y estaño, es un material conductor que se puede aplicar en láminas tan delgadas, que resultan transparentes. Es actualmente el material con el que se hacen los contactos en las pantallas de cristal líquido, en reemplazo del oro usado primitivamente. Además de esa aplicación, se está experimentando un tipo de pantalla formada por pares de discos de aluminio muy pequeños, enfrentados, uno de los cuales tiene un agujero en el medio. Los discos miden una décima de milímetro de diámetro, y una décima de micrón de espesor.[10]




Esa clase de pantalla funciona con iluminación trasera. Cuando el discos de aluminio de un pixel está sin alimentación eléctrica, permanece plano y paralelo al espejo fijo; entonces la luz que pasa al otro lado es nula, o insignificante. Pero cuando se aplica una tensión eléctrica entre el disco perforado

[9] Los oleds suministraban, a fines de 2008, 46 lúmenes por watt, y a mediados de 2009, 76 lúmenes por watt; más de la décima parte de la máxima eficiencia luminosa teórica, que es de 683 lm/W, y comparable con la de los leds inorgánicos. Un watt es un joule por segundo, y la definición de lumen, unidad de flujo luminoso, está en una nota al pie del capítulo 14.

[10] Para esta aplicación, esos espejos no se fabrican más delgados (lo que sería perfectamente posible), porque entonces serían incapaces de reflejar la luz. Para que un objeto refleje, absorba o desvíe la luz, tiene que tener un espesor no mucho menor que el de la longitud de onda de la radiación; y la longitud de onda de la luz visible está comprendida entre los 0,38 micrones del rojo, y los 0,75 micrones del violeta.

y el frente transparente conductor de ITO, ambos cuerpos se atraen, y el disco perforado, que es muy delgado y flexible, se arquea, hace converger la luz, que rebota en el espejo plano de enfrente, y sale por el pequeño agujero; entonces, de frente, se ve luz; aparece un punto luminoso en la pantalla, que será blanco si es monocromática, o de color, si los pixeles están provistos de filtros coloreados.

Parece increíble que una tensión pequeña pueda curvar, sólo por la fuerza electrostática, un espejo metálico. Pero se trata de un metal muy delgado, y de una distancia muy pequeña. De hecho, con la electricidad estática generada por un peine frotado contra el pelo o la ropa, podemos curvar una lámina de papel de aluminio del que se usa en la cocina, a pesar de que es cincuenta veces más grueso que el de un pixel telescópico.

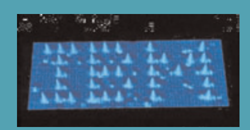
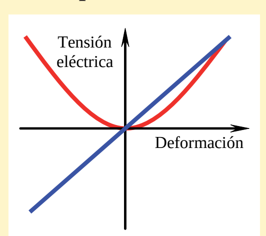


Imagen obtenida con un microscopio de efecto túnel. Con un material piezoeléctrico alimentado con una pequeña tensión variable, se mueve una púa finamente afilada químicamente, que recorre distancias del orden atómico. Si esa punta se polariza positivamente, arranca electrones de los átomos de las cercanías, los que se detectan como pequeños pulsos de corriente. Esos pulsos se amplifican, y se grafican en una pantalla barrida con el mismo movimiento que el de la púa exploradora. Se obtiene, así, una imagen de la distribución de los átomos en un material. No sólo eso; es posible, también, al elevar la tensión, arrancar átomos individuales de un sitio, y ponerlos en otro; así escribieron, en 1989, el acró*nimo de la International Business Machines*, con átomos de xenón, sobre un cristal de níquel.
(El *efecto túnel* es el fenómeno cuántico por el que una partícula puede saltar una barrera de potencial mayor que su energía cinética).

## Materiales piezoeléctricos y electrostrictivos

Desde el siglo XIX se conoce la propiedad del cuarzo, y de otros materiales, de producir electricidad cuando se los deforma, y de deformarse cuando se les aplica electricidad. Ese fenómeno, mencionado en los capítulos 3, 9 y 14, fue útil para hacer fonógrafos de púa, cuyas vibraciones al recorrer el surco del disco, generan una señal eléctrica que se amplifica, y se convierte en sonido. Después, con materiales cerámicos de propiedades más marcadas, se hicieron encendedores que suministran una chispa eléctrica cuando se los golpea, alarmas para relojes, parlantes, audífonos, generadores de ultrasonido para ecógrafos y para limpieza profunda, y osciladores de cristal, que mantienen fija la frecuencia de transmisores, y dan una base de tiempo estable para los relojes electrónicos.

En los materiales piezoeléctricos, la inversión de la polaridad de la tensión eléctrica aplicada, se traduce en una inversión del sentido de la deformación, y ambos efectos, el mecánico y el eléctrico, son aproximadamente proporcionales; eso significa que existe una relación lineal entre la tensión eléctrica y la deformación. El efecto es reversible, o recíproco: la electricidad produce deformación; y la deformación, electricidad.



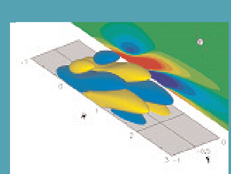

**Representación cualitativa de la electrostricción, en rojo, y la piezoelectricidad, en azul.**

También es conocida desde hace más de un siglo la *electrostricción*,[11] o acortamiento de un objeto cuando se le aplica electricidad. La electrostricción a diferencia de la piezoelectricidad, no es reversible; esto es, el acorta-

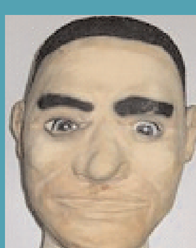
[11] Antes de la electrostricción se conoció la *magnetostricción*, fenómeno por el cual el hierro, y otros materiales, se acortan cuando se los somete a un campo magnético. *Estricción* significa acortamiento. De la misma raíz latina es la palabra *estricto*: estrecho, ceñido, ajustado.



Transductores piezoeléctricos para producir ultrasonido, con fines de pulverización, y de lavado profundo.



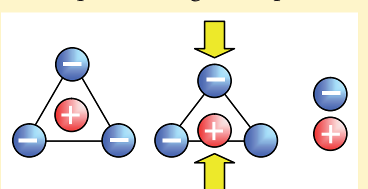
El *Imperial College*, en Londres, estudia la posibilidad de dotar a los barcos de elementos electroactivos en la parte exterior de los cascos. Detectarían la turbulencia, y actuarían en consecuencia para disminuirla, como lo hacen ciertos animales acuáticos, que se desplazan con un mínimo gasto de energía.



Muñeco de goma electroactiva, que cambia su expresión facial, construido en el Centro de Materiales Compuestos del Instituto Harbin de Tecnología, en China, como demostración curiosa de las propiedades de los elastómeros que desarrollan.

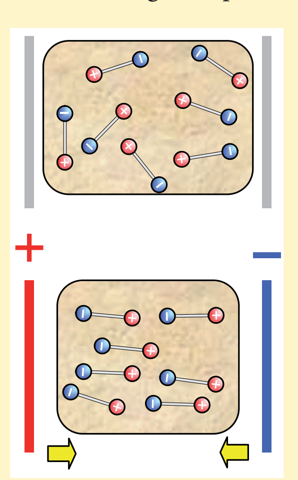
miento o el alargamiento que se induzca por medios mecánicos, no produce electricidad. El acortamiento se produce con cualquiera de las polaridades de la tensión aplicada; y hasta unos 300 V/mm, el acortamiento varía de manera casi cuadrática con la tensión aplicada.

La piezoelectricidad es un fenómeno típico de cristales de determinada clase de simetría,[12] en los que la deformación origina una distribución de cargas eléctricas que dan lugar a dipolos.[13]



**Explicación elemental de la piezoelectricidad. A la izquierda, una celda del cristal sin deformar, con los tres dipolos simétricamente equilibrados. Al medio, deformada; los dipolos se desequilibran. A la derecha, el dipolo equivalente; aparece una tensión eléctrica en el cristal.**

Los cristales cúbicos, como los de cloruro de sodio, tienen un centro de simetría entre caras iguales paralelas, y por eso no presentan piezoelectricidad.



La explicación de la electrostricción es semejante a la de la magnetostricción, y se basa en la orientación de los dipolos del material, bajo la acción de un campo exterior. Con los dipolos orientados, aparecen esfuerzos internos de tracción, que acortan el cuerpo, cualquiera sea la polaridad del campo externo al que se lo someta.

La magnitud del efecto es pequeña en los materiales conocidos, pero aun así útil para muchas aplicaciones. En algunos materiales cerámicos de elevada permitividad dieléctrica, empleados en la fabricación de capacitores, un campo eléctrico de 500 volt por milímetro, puede producir una contracción de más de cinco partes por diez mil, y si el material se mantiene fijo de modo que no se pueda contraer, se generan tensiones mecánicas que acumulan una energía potencial elástica de hasta medio joule por cada kilogramo.

## Polímeros[14] electroactivos

Al igual que todos los dieléctricos, especialmente los de elevada permitividad,

[12] De acuerdo con su simetría, los cristales se clasifican en 32 clases, de las cuales hay 21 que no tienen centro de simetría entre caras paralelas e iguales; y todos ellos, menos uno, exhiben piezoelectricidad.

[13] Un dipolo eléctrico es un conjunto de dos cargas de la misma magnitud, pero de polaridad opuesta, situadas a pequeña distancia una de la otra (los capítulos 7 y 9 mencionan los dipolos magnéticos).

[14] Para la descripción general de los polímeros, véase el capítulo 6.

hay polímeros aislantes que presentan electrostricción, algunos desarrollados especialmente. Los polímeros elásticos; esto es, los elastómeros, tienen la desventaja de ejercer fuerzas mucho menores que las de sus semejantes rígidos, pero en cambio pueden experimentar variaciones de longitud centenares de veces mayores; una elongación ya no de una parte en mil, sino de una parte en diez, o más. La similitud de ese comportamiento con el de los músculos, hace que se los conozca como músculos artificiales.[15] Los EAP (*electroactive polymers*, polímeros electroactivos) también se conocen como DEA (*dielectric elastomer actuators*, actuadores de elastómeros dieléctricos).

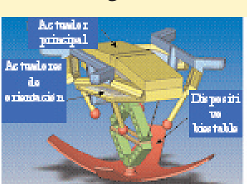
Un actuador es un dispositivo que realiza una acción mecánica cuando recibe un estímulo; por ejemplo un relé, o un motor. El término se aplica más específicamente a los aparatos que realizan un movimiento pequeño. Elastómero es un polímero elástico, por ejemplo una goma de silicona. Y dieléctrico significa aislante de la electricidad.

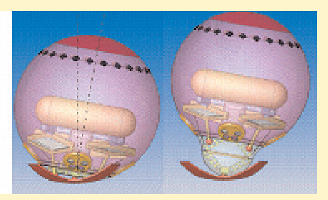
El efecto es reversible, y el estiramiento y acortamiento de un elastómero electroactivo, genera electricidad.

Las aplicaciones de los EAP, DEA o músculos artificiales comenzaron hace poco más de diez años. Entre ellas se encuentran, además de las citadas en la primera página de este capítulo, bombas de circulación de fluidos, relés de media tensión de muy elevada impedancia eléctrica, botines con suelas de goma electroactiva que cargan baterías al caminar con ellos, motores sin eje, robots.



Entre los materiales electrónicos relativamente nuevos están las fibras ópticas para la transmisión de señales. La figura compara un cable troncal de cobre, con una fibra de vidrio de la misma prestación. Primitivamente se usaron en telefonía, y hoy principalmente en Internet.





**Robot del tamaño de una pelota, hecho en el Instituto de Tecnología de Massachusetts con un mecanismo biestable de resortes y cuatro actuadores de elastómero electroactivo. La carga de su batería le alcanza para cien saltos de un metro y medio con la gravedad terrestre, y de nueve metros en la Luna. Puede rodar y saltar sobre terreno escabroso, y se lo concibió para misiones de exploración espacial, en la superficie de planetas y satélites.**

## Fuerza de un dieléctrico electroactivo

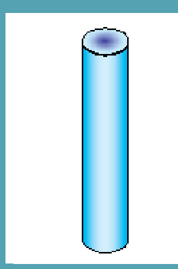
Esa fuerza es igual a la de atracción entre las placas de un capacitor, y está dada por la fórmula de la derecha. La fuerza F, en newton, es igual al producto de la permitividad relativa, sin unidades, por la del vacío, en F/m, por el área, en metros cuadrados,

$$F = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A U^2}{2d^2}$$

[15] De hecho, se han efectuado reparaciones de músculos humanos con esos materiales, pero para actuarlos es necesaria una fuente auxiliar de alimentación; la electricidad de los nervios es insuficiente para excitarlos.

por la tensión, en volt, al cuadrado, dividida por dos y por la distancia entre las placas, en metros, elevada al cuadrado. La disposición plegada de un capacitor, como se ve en la página 219, disminuye la distancia entre las placas, y permite obtener grandes fuerzas.

Los geles electroópticos, mencionados en este capítulo, son también electroactivos, pero como se encuentran en estado semilíquido, no generan esfuerzos, a menos que se los encierre en un recipiente muy rígido.



- Las fibras ópticas se fabrican con dos clases de vidrio de diferente índice de refracción. La luz tiende a viajar por el de mayor índice, en el medio, y así se mantiene alejada de las paredes, y acompaña a la fibra en sus curvas. Para hacer esos hilos, de menos de una décima de milímetro de espesor, se emplean dos crisoles con ambos productos, que se extruyen en forma de varilla, que cuando está aún blanda, se estira hasta que adquiera el espesor correcto.

## Propuestas de estudio

**18.1.** ¿Cuánto vale la fuerza que ejerce un músculo artificial de un centímetro cuadrado de sección, hecho con placas conductoras separadas por un polímero de permitividad relativa igual a 20.000, de espesor 0,1 mm, al que se le aplican 100 V?
**18.2.** Si ese polímero tiene un módulo de elasticidad[16] igual a dos megapascales, y se lo pliega en forma de acordeón de 500 pisos, como se indica en la página 219, ¿en cuánto disminuye su longitud?
**18.3.** Para usar en lugares de muy escasa iluminación, ¿qué es preferible, una pantalla de lcd, o de led? Den, por favor, las razones de la elección.
**18.4.** ¿Dónde se podría obtener, para experimentar, un material de marcados efectos piezoelécricos?

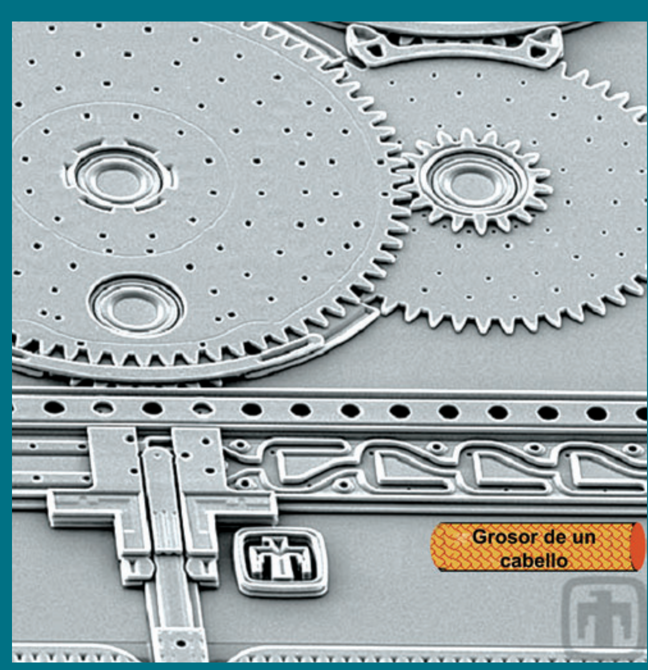
## Otras fuentes de estudio e información

- En este sitio hay una explicación clara del efecto de electrostricción.
  *http://www.uclm.es/profesorado/maarranz/Documentos/alumnosmateriales0506/PIEZOELECTRICIDAD%20Y%20ELECTROSTRICCI%C3%93N.doc*
- En este otro, hay explicaciones detalladas sobre cristales líquidos.
  *http://rabfis15.uco.es/cristalesliquidos/todointro.htm*

[16] El módulo de elasticidad de un material es el cociente entre la presión a la que se lo somete, y la disminución relativa de su longitud. Se puede pensar, de manera más intuitiva, aunque menos exacta, en la presión que reduce a la mitad el tamaño del objeto.

# Capítulo 19

## Sistemas microelectromecánicos (MEMS)[1]




● Engranajes microscópicos de silicona, fabricados por los Laboratorios Nacionales Sandia, un organismo militar (véase el símbolo del águila) en Albuquerque, Estados Unidos. El mayor mide 0,4 mm de diámetro, y cada diente, 20 micrones, menos del grosor de un cabello. Se los fabrica con técnicas ópticas, de rayos X, y químicas, semejantes a las empleadas en la elaboración de circuitos integrados.
Los pequeños hoyos provienen de golpes de planchado, para que las ruedas permanezcan planas, y no se desengranen.



● Abajo, un mecanismo elaborado con un material más reciente, la *silicona planarizada*, cuya estructura molecular no requiere planchado. Cada vez que una de las piezas alargadas recibe una señal eléctrica, se adelanta por atracción electrostática, y cuando la tensión desaparece, vuelve a su sitio, por elasticidad. Cada pulso hace avanzar un diente, en una bomba que usa la industria farmacéutica para dosificar volúmenes microscópicos de líquidos. Las imágenes se obtuvieron con la técnica de barrido electrónico, porque la longitud de onda de la luz visible es demasiado grande, en comparación con los detalles de las piezas, los que saldrían borrosos en una fotografía óptica. Los mecanismos acompañan la tendencia a la miniaturización ya conocida en los componentes y circuitos electrónicos, y tienen cada vez más aplicaciones útiles y pacíficas; en inyectores de tinta de impresoras, medidores de presión arterial, detectores de vibraciones, y pantallas con piezas móviles que hacen girar diminutos espejos muchas veces por segundo, desvían la luz y forman las imágenes.

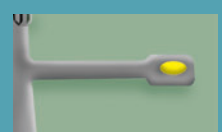
[1] Del inglés, *micro electromechanical systems.*

# Sistemas microelectromecánicos (MEMS)

| Prefijo | Simbolo | Factor | Mnemo |
|---|---|---|---|
| yocto | y | $10^{-24}$ | ocho |
| zepto | z | $10^{-21}$ | siete |
| atto | a | $10^{-18}$ | (1) |
| femto | f | $10^{-15}$ | (1) |
| pico | p | $10^{-12}$ | sobra |
| nano | n | $10^{-9}$ | enano |
| micro | μ | $10^{-6}$ | pequeño |
| mili | m | 0,001 | mil |
| centi | c | 0,01 | cien |
| deci | d | 0,1 | diez |
| – | – | 1 | |
| deca | d | 10 | diez |
| hecto | h | 100 | cien |
| kilo | k | 1000 | mil |
| mega | M | $10^{6}$ | grande |
| giga | G | $10^{9}$ | gigante |
| tera | T | $10^{12}$ | cuatro |
| peta | P | $10^{15}$ | cinco |
| exa | E | $10^{18}$ | seis |
| zetta | Z | $10^{21}$ | siete |
| yotta | Y | $10^{24}$ | ocho |

● Prefijos de múltiplos y submúltiplos. La tercera columna da una pista mnemotécnica para recordar los menos usuales. Por ejemplo, tera se parece a tetra, cuatro, y como $3 \times 4 = 12$, un teraohm equivale a $10^{12}\,\Omega$. Los símbolos van en mayúscula a partir de mega.

*(1)* ***Femto*** *y* ***atto*** *significan quince y dieciocho en danés. Las introdujo el físico Niels Bohr, estudioso del átomo, cuyo núcleo mide, aproximadamente, un femtometro.*



● Contacto de oro de 50 nanómetros de diámetro, cubierto con 6 attogramos de azufre. (Imagen procesada por Craighead Group, Cornell University).

## ● La escala pequeña

En el primer capítulo mencionamos los prefijos que indican los múltiplos y submúltiplos de las unidades físicas, entre ellos *micro* y *nano*. Aunque en griego *micro* es pequeño, esa palabra significa, como prefijo, la millonésima parte de la unidad. *Nano*, por otra parte, es enano en latín; pero, en el sentido técnico, es la milmillonésima parte de la unidad.

Cuando en el ambiente tecnológico se utiliza la palabra micro, generalmente, se quiere significar algo pequeño,[2] sin que importe exactamente su tamaño, y ni siquiera su orden de magnitud. En cambio, cuando se dice *nanotecnología* se hace referencia, específicamente, a tamaños del orden de un nanómetro, o la millonésima parte de un milímetro. Esa longitud es quinientas veces más pequeña que una onda de luz; entonces, no podemos ver, directamente y con luz visible, objetos nanotecnológicos, cuyo tamaño es el de pocas decenas de átomos.

Lo pequeño funciona de modo diferente a como lo hace lo más grande, aunque en un caso y el otro valgan las mismas leyes físicas. Entre los muchos fenómenos que ocurren, hay algunos que se manifiestan en diversa medida, de acuerdo con el tamaño de los objetos.



● **La tensión superficial sólo sostiene cuerpos pequeños sobre el agua, porque tienen mucha área por cada miligramo de masa.**

Por ejemplo, un incendio en un bosque o en una mina de carbón puede durar meses encendido; un brasero, horas; en cambio un ascua se apaga en menos de un segundo.[3] Un flan pequeño, cuando se lo desmolda, se mantiene erguido y firme sobre su base, mientras que uno grande se aplasta y esparce en el plato por su propio peso. Una paloma puede desprenderse de sus excrementos mientras vuela, no así una mosca, que los adhiere a un objeto fijo. Las bacterias magnetotácticas mencionadas en el capítulo 7 distinguen el arriba del abajo mediante un órgano magnético; ya que en su pequeño

[2] Por ejemplo, un microinterruptor, o *micro-switch*, es un interruptor muy pequeño, pero no tanto como un micrón. Reciben ese nombre interruptores de un centímetro de tamaño, o más, y cuyos contactos, cuando abren y cierran un circuito, recorren una distancia del orden de un milímetro.

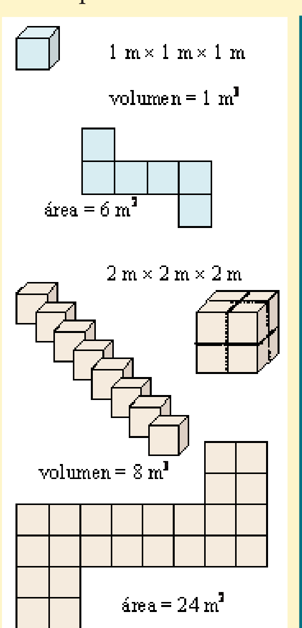
[3] Por eso no hay animales homeotermos, también llamados de sangre caliente, de menos de un centímetro; porque para mantener su temperatura quemarían el alimento en menos tiempo del necesario para conseguirlo, y aun ingerirlo.

tamaño de un micrón, no funcionaría un órgano basado en la gravedad de un líquido, como nuestro oído medio, que nos provee esa orientación a los animales mayores.

Entonces, la micromecánica y la nanomecánica van más allá de la disminución del tamaño de mecanismos mayores de eficacia conocida. Si sólo se redujese la escala, sin ningún otro cambio, aparecería efectos (muchos de ellos inconvenientes) que no se observan en la escala grande, y a veces ni se sospechan, como la adherencia electrostática entre piezas, la dificultad para mantener diferencias de temperatura entre dos puntos, la extraordinaria viscosidad de los líquidos (que, en gran cantidad, parecen muy fluidos), el efecto del sonido en los mecanismos de engranajes pequeños, la adherencia del polvo e impurezas, y la condensación de la humedad, cuyas pequeñas gotas pueden frenar por completo una rueda, o una palanca.

En el diseño de MEMS se tienen presentes esos efectos de escala, y se consideran sin necesidad de toparse con ellos por sorpresa, como quizás ocurrió en los comienzos de esa tecnología.

El razonamiento básico se funda en que, cuando un cuerpo tiene un tamaño doble que otro, su área es cuádruple; y su volumen, óctuple.




**• Arriba, un cubo de un metro de lado. Su volumen es de un metro cúbico, y su área, de seis metros cuadrados. Si tuviera la densidad del agua pesaría mil kg, y apoyado sobre su cara inferior ejercería sobre el suelo una presión de mil kg por metro cuadrado.**

**• Abajo, un cubo de dos metros de lado. Su volumen es de ocho metros cúbicos, y su área, de veinticuatro metros cuadrados. Si su densidad fuera la misma que la del cubo anterior, pesaría ocho mil kg, y apoyado sobre su cara inferior, cuya área es de cuatro metros cuadrados, ejercería sobre el piso una presión de dos mil kg por metro cuadrado, el doble que antes. Así entonces, sería bien posible que un cubo pequeño se sostenga, mientras que uno grande, y del mismo material, se desmoronara. Los cuerpos pequeños son más robustos, en proporción, que los grandes.**

Las piezas muy pequeñas, de prototipos ensayados en una escala mucho mayor que la de servicio, presentan muy disminuidas las propiedades de volumen, masa y peso, en comparación con las de área, y con las de longitud. Por ejemplo, si se confiaba en el peso de una parte, para que vuelva a su posición de reposo cuando



• El físico italiano Galileo Galilei fue el primero en notar las diferencias de comportamiento de los objetos de diferente tamaño. El dibujo, trazado por el investigador italiano en 1638, representa un hueso de ratón, y el homólogo de un caballo, mucho más robusto. Si éste fuera una mera ampliación, el hueso se rompería, porque el caballo es mil veces más pesado que el ratón, pero el área transversal de su hueso sería apenas cien veces mayor; y el hueso estaría, por eso, diez veces más esforzado. Los MEMS, por su pequeñez, son muy robustos.



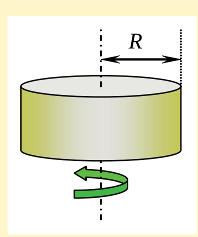
• Detalle de una pata de mosca. Los pelos eliminan cargas eléctricas que capturarían polvo. Aun así, el insecto se debe frotar patas, alas y cabeza, para quitarse laboriosamente las partículas, tarea innecesaria para los animales grandes. (*Nature*, diciembre de 2007.)

se la suelta, se hallará, en la réplica pequeña, que ese peso es insignificante, y que no alcanza para despegar la pieza de la que la sostenía, a la cual quedará adherida electrostáticamente.[4] Es que la carga eléctrica responde a la superficie, mientras que el peso depende del volumen.

Así como la pequeñez trae esos inconvenientes, tiene también ventajas, entre ellas la robustez. La velocidad de giro de un motor de automóvil, o de lavarropas, es del orden de las mil revoluciones por minuto. Una amoladora de disco, alcanza las tres mil. Una mayor velocidad de giro haría que esos motores se despedacen; o que, sin eso, vibren tanto, que se desgasten en poco tiempo. Un torno de dentista, más pequeño, alcanza fácilmente las diez mil revoluciones por minuto. Y un motor mems, si es suficientemente pequeño, puede girar a medio millón de revoluciones por minuto.

Veamos en detalle físico y cuantitativo ese efecto, a través de un ejemplo simplificado, resuelto mediante una técnica aproximada de estimación, basada en el *análisis dimensional*.[5]

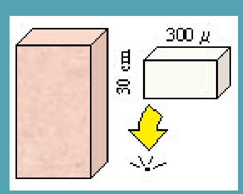
Imaginemos una pieza giratoria de radio $R$ (en metros), una densidad $\rho$ (en kilogramos por metro cúbico), hecha con un material que resiste una tensión mecánica $\sigma$ (en pascales, o N/m), y que gira a una frecuencia $n$ (en revoluciones por minuto). Supongamos, además, que esa máquina se diseñó al límite de su resistencia mecánica, y que si girase a mayor frecuencia que $n$, se rompería. ¿Qué relación existe entre las magnitudes mencionadas?




El análisis dimensional ofrece la siguiente rutina de resolución. Partimos de la hipótesis de que $n$ es proporcional al producto de las otras magnitudes, cada una de ellas elevada a una potencia incógnita, designada con una de las letras alfa, beta y gamma. (Esa potencia podrá ser positiva, negativa, nula, entera o fraccionaria.)

$$n = R^{\alpha} \rho^{\beta} \sigma^{\gamma} \qquad [1]$$

La unidad revoluciones por minuto se escribe 1/min. Reducimos las unidades 1/min, m, kg/m$^3$ y N/m$^2$, a longitud (L), masa (M) y tiempo (T). Tenemos en




- Seguramente oímos alguna vez cómo suena un ladrillo bien cocido, cuando se lo golpea con una cuchara de albañil. El ladrillo *canta* una nota de frecuencia cercana a 1 kHz. Con razonamientos de análisis dimensional, se puede concluir que, si el ladrillo midiera mil veces menos, vibraría a 1 MHz. Precisamente, se usan cristales de cuarzo piezoeléctricos de ese tamaño, y más pequeños, como osciladores electromecánicos de gran estabilidad, para la base de tiempo de los relojes de cuarzo, y para estabilizar la frecuencia de transmisores de radio y TV (el capítulo anterior da más detalles sobre el comportamiento del cuarzo, y otros materiales piezoeléctricos). Por su diminuto tamaño, esos cristales piezoeléctricos se consideran MEMS: microsistemas electromecá nicos.

---

[4] En algunas operaciones quirúrgicas para implantar huesecillos de plástico en el oído medio, en reemplazo de los originales dañados por una infección, los cirujanos deben usar herramientas especiales, para poder soltar los diminutos repuestos sin que se queden pegados a las pinzas.

[5] Ese método busca una relación matemática entre las magnitudes físicas que intervienen en un problema, de modo que se satisfaga la correspondencia de unidades. Por ejemplo, si suponemos que el período de un péndulo depende de la longitud L del hilo, en metros, y de la aceleración g de la gravedad, en metros por segundo al cuadrado, entonces la relación tiene que ser parecida a $T = k\sqrt{(L/g)}$, dado que otra diferente haría que no se correspondan las unidades. La fórmula verdadera, hallada a partir de consideraciones físicas, es $T = 2\pi\sqrt{(L/g)}$. La constante $k$ no la da este método, pero igualmente es útil, si lo que interesa es evaluar un orden de magnitud, y no una cantidad exacta.

cuenta que 1 N (un newton) equivale a 1 $kg.m/s^2$, por lo que $N/m^2$ es lo mismo que $(kg.m/s^2)/m^2$); o, si simplificamos, $kg/(s^2.m)$.

$$[n] = T^{-1} \qquad [R] = L \qquad [\rho] = M.L^{-3} \qquad [\sigma] = M.T^{-2}.L^{-1}$$

Los corchetes rectangulares indican las dimensiones. Se lee: las dimensiones de la frecuencia son de inversa de tiempo, o tiempo a la menos uno; las dimensiones del radio son de longitud; las dimensiones de la densidad son de masa por longitud a la menos tres; y las dimensiones de la tensión mecánica resistida son de masa por tiempo a la menos dos, por longitud a la menos uno.

Escribimos nuevamente la ecuación [1] para las dimensiones, y resulta:

$$T^{-1} = L^{\alpha} M^{\beta} L^{-3\beta} M^{\gamma} T^{-2\gamma} L^{-\gamma}$$

Para que se cumpla esa igualdad, las potencias conjuntas de cada dimensión (letras M, L y T) deben sumar lo mismo de un lado y otro de la igualdad:

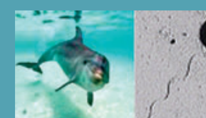
$$0 = \beta + \gamma \qquad 0 = \alpha - 3\beta - \gamma \qquad -1 = -2\gamma$$

De esas tres ecuaciones deducimos que $\alpha = -1$ $\beta = -½$, y $\gamma = ½$.

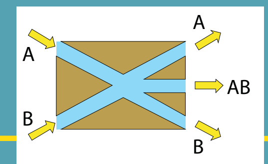
La potencia ½ equivale a la raíz cuadrada; y la potencia –½, a la inversa de la raíz cuadrada. La fórmula que estamos buscando es cercana, entonces, a la siguiente:

$$n = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$

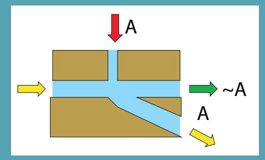
La fórmula verdadera podrá no tener esa apariencia exacta. Faltará, quizás, un factor sin unidades, que dependa de la forma de la pieza giratoria. Pero lo que sí podemos concluir, es que para una dada densidad (la misma, aproximadamente, para piezas de tamaño ordinario que para las micromecánicas), y para una cierta resistencia a los esfuerzos mecánicos (también la misma, o semejante, en ambos casos), la velocidad de rotación que puede alcanzar una pieza sin romperse, es inversamente proporcional a su radio. Cuanta más pequeña sea la pieza, más vueltas podrá dar por minuto sin que se deshaga. Si un motor de coche mide medio metro de diámetro, y gira a dos mil revoluciones por minuto, un motor diminuto de medio milímetro de diámetro podría girar, entonces, a dos millones de revoluciones por minuto; y en verdad lo hace, a una velocidad no muy diferente de ésa, sin sufrir daños.

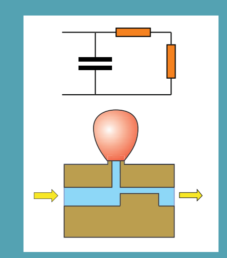



Por su tamaño, un delfín puede avanzar por inercia varios cuerpos sin nadar. Pero una bacteria se detiene casi al instante; y además, presa de la tensión superficial, no puede saltar, como sí lo hace el mamífero.




Compuerta AND. Cuando ingresa líquido por las dos entradas A y B, los chorros interfieren, y salen juntos por AB. En cambio, si falta alguno de ellos, o los dos, no hay salida central. En color oscuro, el material sólido del laberinto; y en claro, el fluido que circula. Abajo, compuerta inversora. Cuando aparece la señal A (en rojo), desaparece en ~A (verde).



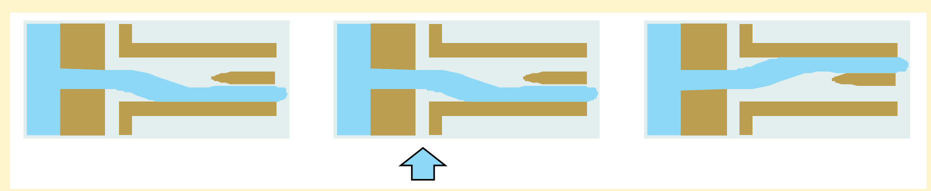



Equivalente fluídico de un filtro eléctrico. El capacitor y el resistor amortiguan las variaciones bruscas de la tensión de entrada. El globo rojo, que representa una cámara elástica, y el canal estrecho que le sigue, amortiguan las variaciones bruscas de la presión de entrada del fluido. Los componentes fluídicos pueden imitar muchos circuitos electrónicos.

## Fleurics (unidades fluídicas)

Los fluidos son los líquidos y los gases, y su estudio se denomina hidráulica. Pero cuando esta rama de la física se aplica a sistemas de control de complejidad lógica semejante a la de los circuitos electrónicos, se la denomina *fluídica*.[6] Dado que la fluídica es una parte de la hidráulica, y ésta lo es de la mecánica, las unidades fluídicas no son MEMS, ya que su funcionamiento puede excluir la electricidad. Sin embargo, las mencionamos, igualmente, en este capítulo, por las semejanzas de orígenes y de aplicaciones entre la microfluídica, la microelectrónica y los microsistemas electromecánicos.

Los componentes de la fluídica son las unidades fluídicas, conocidas también como *fléurics*. Estos dispositivos, mencionados en el capítulo 17, cumplen muchas de las funciones que tradicionalmente efectúan los componentes y circuitos electrónicos. Sirven de amplificadores, osciladores y compuertas lógicas, y en algunos casos operan con ventajas, ya que no sufren interferencias electromagnéticas.[7] Sus aplicaciones crecieron como consecuencia de la posibilidad de fabricar componentes de tamaño microscópico. Los fleurics pueden funcionar con agua, aceite o gases, con suspensiones de sólidos en líquidos, o con burbujas de gas en líquido, las que facilitan ciertas funciones digitales.



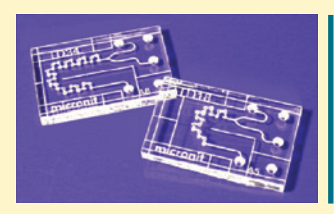
**Flip-flop, o multivibrador biestable, construido con un elemento fluídico. El líquido entra por la izquierda, y tiende a adherirse a una pared del tubo de salida, dividido por un tabique. Cuando se aplica un pulso lateral de control, con líquido que se inyecta por una de las dos compuertas laterales, el filete se despega de esa pared, y se adhiere a la opuesta, hasta que se le aplique un pulso líquido por la otra compuerta de control. Es posible, con una forma asimétrica apropiada del laberinto, hacer que el multivibrador sea monoestable; esto es, que el filete de circulación regrese a la pared primitiva cuando cesa el chorro de control. Si las aberturas de control son más de una, el dispositivo actúa como una compuerta OR.**

Los circuitos fluídicos se suelen construir como los circuitos impresos de la electrónica, pero con un relieve mayor, de modo que, al taparlo herméticamente

[6] Podríamos decir que la relación que existe entre la electrónica y la electricidad, es semejante a la que hay entre la hidráulica y la fluídica.

[7] Los fleurics se desarrollaron, al inicio, con fines balísticos. Como el mecanismo carece de componentes electrónicos, es insensible a las interferencias electromagnéticas que se le puedan enviar como defensa. En 1965, cuando ya casi no había secretos fluídicos para ninguna potencia militar, ese conocimiento se brindó al público.

con una lámina plana, quede un laberinto de espacio suficiente, que vincula las diversas unidades por las que circula el fluido.




**Variante de circuito fluídico, usada para mezclar dos líquidos por *advección* o arrastre. Los líquidos se inyectan en los canales de entrada, y se mezclan por las turbulencias que se generan en cada codo del laberinto (foto de Micronit Microfluidics).**

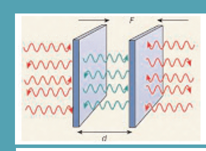
## El efecto Casimir

Es curioso lo que ocurre con muchas ideas científicas. Al comienzo, son sólo especulaciones sin mucho fundamento, que muchos critican,[8] y hasta rechazan, con razones que en el momento parecen sobradas. Pasado un tiempo, esas ideas se aceptan, o, al menos, se estudian con curiosidad. Después, algunas se corroboran en complejos y delicados experimentos; pero el conocimiento resultante sólo tiene interés teórico. Pasan algunos años, y a esa idea se le saca provecho; o, sin eso, se perciben sus manifestaciones prácticas en alguna rama de la industria. Y, por fin, se fabrican centenares de miles de millones de componentes, que forman parte de artefactos domésticos e industriales, basados en un principio físico que, pocas décadas antes, era sólo una idea atrevida.

Eso pasó con los satélites, la relatividad del espacio y el tiempo, la energía nuclear, el efecto túnel cuántico (mencionado en el capítulo 2), y con muchas otras ideas, entre ellas la llamada *fuerza del vacío*,[9] *fuerza del punto* cero, o efecto Casimir, en honor de Hendrik Casimir (1909–2000), quien descubrió, en 1948, que aun en un vacío teóricamente perfecto, sin materia ni radiación, y en el cero absoluto de temperatura, las llamadas *fluctuaciones cuánticas* de la radiación (que no puede ser absolutamente nula, y adopta por momentos valores diferentes de cero) generan una fuerza de atracción entre placas conductoras planas y paralelas, y de repulsión en ciertos casos de curvatura. Esa fuerza es muy pequeña, y no se percibe en experimentos con cuerpos de tamaño visible; pero se empezó a notar cuando se fabricaron objetos de pocos nanómetros. Al principio eso era un inconveniente que dificultaba el movimiento de las piezas; pero después, resultó una nueva variable de control, de efectos aprovechables.

[8] Albert Einstein, uno de los más grandes científicos de la historia, y cuyos conocimientos y seriedad de argumentación fueron siempre indiscutibles, negaba, al principio, la física cuántica, a pesar de que años después le otorgaron el premio Nobel justamente por la explicación cuántica del efecto fotoeléctrico (en el capítulo 11 se comenta el caso).

[9] Hay quienes la llaman *fuerza de la nada*, para causar perplejidad, como si hiciera falta alguna razón adicional para quedar perplejos ante ese fenómeno, ajeno a la percepción ordinaria y cotidiana.



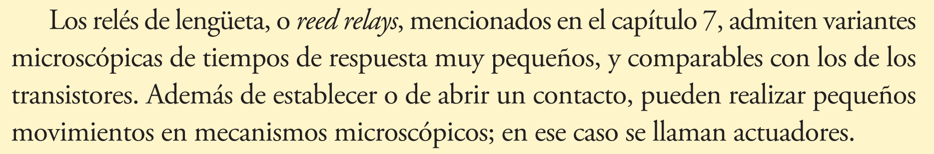
$$F_c = \pi hc \frac{A}{480\, d^4}$$

Efecto Casimir. La radiación encerrada entre las placas conductoras, y, por tanto, reflectantes, genera interferencias que alteran el balance con la radiación externa (que no interfiere del igual manera). Con eso, predomina la presión ejercida por la radiación exterior. La fuerza es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la separación. A una distancia entre placas de cien diámetros atómicos, la presión de Casimir es de una atmósfera.
***FC**: fuerza de Casimir, en N; **c**: velocidad de la luz, 299792458 m/s; **h**, constante de Planck, 6,626068×10$^{-34}$ m$^2$.kg/s; π, 3,14159265; **A**, área, en m$^2$; d, separación, en m.*

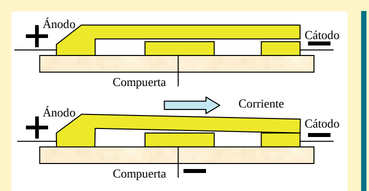
## Microactuadores y relés electrostáticos



Microrelé electrostático de lengüeta móvil, de 10 μ de ancho, 2 de espesor y 100 de largo, separada 2 μ, desarrollado en la Northeastern University, Boston, Estados Unidos. Resistencia de contacto, 20 Ω; tensión, 100 V; corriente, 1 mA; tiempo de actuación, 1 μs; vida, 10 millones de operaciones.



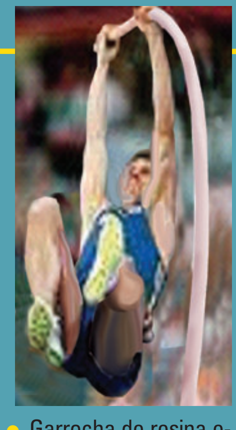
Los relés de lengüeta, o *reed relays*, mencionados en el capítulo 7, admiten variantes microscópicas de tiempos de respuesta muy pequeños, y comparables con los de los transistores. Además de establecer o de abrir un contacto, pueden realizar pequeños movimientos en mecanismos microscópicos; en ese caso se llaman actuadores.




**Relé electrostático. Cuando se polariza la compuerta, atrae la lámina flexible del ánodo, que establece contacto con el cátodo.**

Los actuadores electrostáticos son, especialmente, efectivos en los tamaños pequeños. No consumen corriente por la compuerta, y en eso se asemejan a los transistores de efecto de campo. Si la lengüeta de un relé de este tipo es, suficientemente, larga, se puede sujetar por los dos extremos, y también se flexiona al polarizar la compuerta; eso torna el relé menos sensible a las vibraciones y al sonido. Su funcionamiento es reversible: el movimiento de su lengüeta varía la capacitancia, y eso induce una señal en la compuerta, con lo que el actuador sirve, además, de *acelerómetro* capacitivo, o instrumento para medir aceleraciones.

## Nanotubos, nanoláminas y nanoesferas



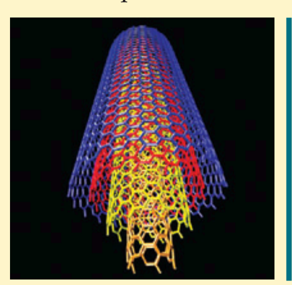
Garrocha de resina epóxica reforzada con fibras de vidrio de un grosor de cien nanómetros. El vidrio ocupa aproximadamente el 70 % de la masa, y la mitad de su volumen.

Se llaman *nanotubos* los cilindros de diámetro prácticamente atómico. Tienen variadas aplicaciones nanotecnológicas, y tuvieron su origen en fibras de grosor mucho mayor, y de propósitos modestos, como el de reforzar estructuras de plástico. El vidrio, por ejemplo, es un material cuya resistencia a la rotura a la tracción es pequeña; no mucho mayor que la de los plásticos. Pero cuando se lo hila finamente, adquiere una resistencia a los esfuerzos muy elevada, que no tiene una barra maciza de la misma sección transversal total. El clásico concepto de resistencia a la tracción, en newton por metro cuadrado, o kilogramos por centímetro cuadrado, no tiene aplicación en el caso de los hilados, porque la fuerza resistente parece no ser proporcional a la sección, en centímetros cuadrados, como en los objetos más gruesos, sino al perímetro, en centímetros lineales. En el conjunto de las fibras de vidrio que refuerzan el plástico de una caña de pescar, un aislador o el eje de un motor, la cantidad total de perímetro de las fibras hiladas es muy grande, y lo mismo ocurre con la fuerza que puede resistir el haz. Lo mismo se

experimentó con fibras de carbono, que resultaron aun más resistentes que las de vidrio, ambas de grosor cercano a un micrón, diez veces más fino que el de una tela de araña.

Descubierto ese hecho, se fabricaron fibras cada vez más delgadas, para usarlas como refuerzo, hasta tropezar con el límite atómico. Es imposible hacer una fibra de grosor menor que el de un átomo, y, de hecho, debe tener un diámetro de varios átomos, para que éstos se puedan acomodar en una estructura estable.

En el caso del carbono, esa estructura es una malla hexagonal cerrada en forma de tubo, que recibió el nombre de nanotubo.



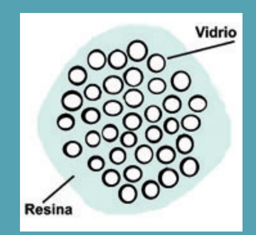
**Representación artística de varios nanotubos de carbono. Cada átomo de ese elemento ocupa un nodo de la red. Hay tubos de una sola capa, como éstos, y otros de estructura más compleja, con varias capas vinculadas entre sí mediante enlaces atómicos. Esta figura no representa la torsión que pueden tener los nanotubos, hacia la izquierda o hacia la derecha.**

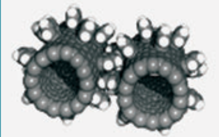
Aunque los nanotubos se conocen, en teoría, desde 1950, la evidencia de su existencia, y su fabricación, datan de 1991 (en 1994 se logró una estructura plana, llamada *grafeno*, por su semejanza con el grafito). Sus propiedades son nuevas y extrañas, y dan lugar a variadas aplicaciones. Forman parte de MEMS, como piezas móviles, y como conductores eléctricos. Se estudia la posibilidad de almacenar átomos de hidrógeno en esos tubos, sin necesidad de mantenerlo a presión, lo que sería de gran utilidad en los automóviles que usen ese elemento gaseoso como combustible. Se aprovecharía su torsión estructural para fabricar nanomotores. Resisten, además grandes fuerzas.[10] Y si se los pudiera hacer muy largos (actualmente no llegan a tener ni un micrón de longitud), se podrían usar como cables capaces de conducir muchos amperes por milímetro cuadrado.

Para fabricar nanotubos se vaporiza carbono (con arcos eléctricos, láseres, u otros medios), y se deja que su vapor se condense y cristalice sobre superficies frías. Los nanotubos se forman naturalmente al ordenarse los átomos, y su grosor y longitud dependen de las temperaturas de los vapores y de las paredes del recipiente, y de otros parámetros del proceso.

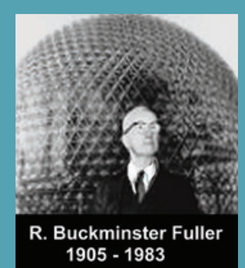
Con técnicas similares, Jun Ni y otros investigadores construyeron, en 2009,

[10] En 1895, mucho antes de los satélites, el científico ruso Konstantin Tsiolkovsky, mientras admiraba la hoy famosa torre diseñada por Alexandre Gustave Eiffel, y comentaba con él su diseño, concibió la idea de hacer una construcción de más de cien mil kilómetros de altura, que se mantendría erguida y tirante gracias a la rotación terrestre, para usarla como escalera para poner cargas en órbita, con gran ahorro de energía en comparación con los cohetes. El material necesario para erguir una antena o torre semejante, de grosor y densidad uniforme, debería resistir decenas de miles de kilogramos por centímetro cuadrado. Pues bien, los nanotubos de carbono satisfacen, hoy, esa exigencia.



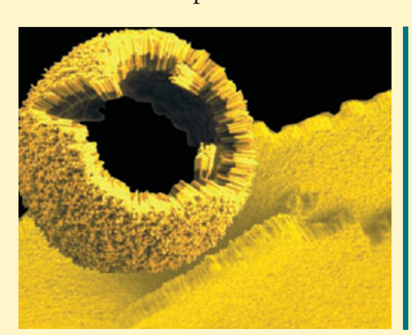



Nanoengranajes atómicos de fulereno. (Imagen de la NASA). El fulereno, como el grafito y el diamante, resulta de una de las formas en que se pueden unir y ordenar los átomos de carbono. Su nombre rinde homenaje a Richard Buckminster Fuller, arquitecto creador de la cúpula geodésica, o geoda.



nanotubos de boro, y hojas de espesor atómico de ese elemento. La posibilidad la habían predicho un año antes, con la ayuda de modelos de computadora. Esos materiales tendrían aplicación electrónica en la fabricación de transistores y compuertas lógicas de muy pequeño tamaño.

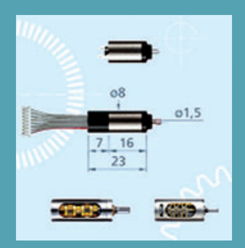
Siempre con el procedimiento de condensar vapores sobre superficies más frías (el mismo que se usa a veces en la fabricación de transistores, microprocesadores y circuitos integrados), se obtuvieron láminas de carbono, de silicio, y de otros elementos, de apenas uno o dos átomos de espesor.



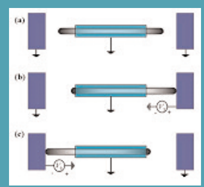
**Esfera de oro y polímero, de un nanómetro de diámetro (su color amarillo es puramente simbólico, porque la imagen se obtuvo por barrido electrónico, sin luz visible). La técnica constructiva, inspirada en la formación de la membrana de una célula viva, la desarrolló el grupo de investigación que dirige Chad Mirkin en la Northwestern University, e incluye la unión de pequeños cuerpos de oro, con polímeros. Los conjuntos tienden a unirse de manera ordenada, en láminas curvas y esferas.**

Las técnicas de fabricación de nanotubos, nanoesferas y nanosuperficies, en las que parte del trabajo se hace solo y de modo casi espontáneo, como resultado de las fuerzas de interacción entre las partes, recuerda la manera en la que, en los seres vivos, la materia inorgánica se organiza en moléculas orgánicas, como los aminoácidos y las proteínas, para formar la pared de una célula, u otras estructuras de complejidad mayor.[11]

En 2007, el científico coreano Ji-Hoon Lee, y otros miembros del Departamento de Materiales del Instituto de Ciencias Gwangju, en la república de Corea, reportaron que las bacterias Shewanella sintetizan nanotubos de sulfuro de arsénico, de 20 a 100 nanómetros de diámetro, que poseen propiedades fotoconductivas; esto es, conducen la electricidad cuando la luz incide sobre ellos. Se abrió, con esa observación, la posibilidad de fabricar nanotubos por medios biológicos, en una técnica que combina la nanotecnología con la biotecnología.




Micromotor de la serie 0816, de ocho milímetros de diámetro, fabricado por *MicroMo Electronics*. Alcanza una velocidad de 17.000 rpm, tiene un par de arranque de 0,41 mN.m, y desarrolla una potencia mecánica de 0,18 W. Funciona, como muchos otros motores eléctricos, con la fuerza que se ejercen imanes y bobinas. Los que la industria llama *micromotores* están muy lejos de tener un tamaño de un micrón.

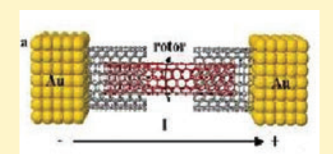



Proyecto de memoria para computadoras, basado en un mecanismo de nanotubos con movimiento telescópico, que funciona como un relé conmutador de tres posiciones, con un tiempo de respuesta de $10^{-11}$ s. El aparato, que en estado de reposo no consume energía, lo desarrolló Tao Jiang, en la Universidad de California.

[11] El ingeniero Eric Drexler, cuando estudiaba la posibilidad de sembrar nanobots (robots nanométricos) para degradar contaminantes químicos del suelo y el agua, sugirió, en 1986, una aventurada y fantástica hipótesis que llamó la *melaza gris* (*grey goo*) Según esa idea, en algún laboratorio se podrían fabricar nanobots capaces de replicarse a sí mismos, que luego escaparían por accidente, y se reproducirían de manera descontrolada, a partir de la materia del medio ambiente. Muchos juzgan descabellada esa especulación, a pesar de que la aparición de la vida en nuestro planeta la muestra como teóricamente factible, y de que ése es justamente el comportamiento de algunos virus, los cuales se pueden manipular genéticamente con técnicas que, en lo sustancial, se asemejan a los procedimientos de construcción propios de la nanotecnología. En medios científicos serios, que incluyen al propio Drexler, hoy se descarta esa catastrófica posibilidad. La melaza gris no podría competir con la vida, que está aprendiendo a sobrevivir desde hace tres mil millones de años.

## Nanomotores

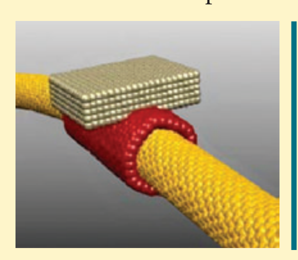
Las máquinas rotativas de tamaño nanométrico son muy diferentes de los motores eléctricos, o de explosión, que conocemos en el tamaño habitual, o pequeño, pero visible. Y también difieren sustancialmente de los *micromotores*, nombre que reciben los motores cuyo tamaño es del orden de un centímetro, o pocos milímetros. Los nanomotores, de tamaño del orden del nanómetro, son verdaderas moléculas móviles, de estructura especialmente diseñada y construida, y están formados por pocos miles de átomos. Algunos ya existen realmente; y muchos otros son sólo ideas, en la fase inicial de proyecto y experimentación.




**Diseño de nanomotor propuesto por Colin Lambert. Un nanotubo de carbono de un nm de diámetro y diez de longitud, gira dentro de otros tubos de mayor diámetro, que le sirven de cojinetes, sujetos a electrodos de oro.**

En este tipo de construcciones, las distancias son tan pequeñas, que los electrones pueden saltar de un sitio a otro, aunque los objetos no se toquen.[12] Se cree que el pasaje de una corriente eléctrica entre los electrodos, inducirá un giro, por la estructura en espiral que se le daría al nanotubo central.

Otros diseños permiten un desplazamiento lineal, en vez de rotativo. Si se ajusta un nanotubo corto de carbono alrededor de otro más largo, el de afuera se desplaza hacia el extremo de menor temperatura, donde las vibraciones de los átomos son de menor amplitud, y transmiten, por eso, un impulso menor.

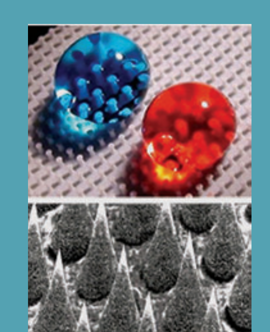


**Motor de desplazamiento lineal, ideado en el Instituto de Nanotecnología y Diseño Molecular, Cataluña, España.**

Ese motor lineal es útil como herramienta de exploración en microscopios de fuerza atómica y de efecto túnel,[13] gracias a que con un control adecuado de las temperaturas, se pueden controlar desplazamientos de menor orden que el tamaño de un átomo.

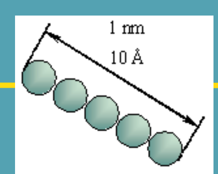



Nanorepelentes. Inspirados en la estructura microscópica de las hojas de taco de reina (*Tropaeolum majus*), que no se mojan, en varios laboratorios desarrollaron materiales y cubrimientos hidrófobos, que imitan la estructura microscópica de la hoja, y también la nanoscópica, o estructura molecular. Arriba, el vegetal. Abajo, el material sintético. La propiedad es útil, por ejemplo, para mantener limpios los aisladores eléctricos. Foto, Anish Tuteja y Wonjae Choi.



[12] Lo que llamamos *tocar* está lejos de nuestra idea intuitiva de compartir un punto geométrico. Lejos de eso, el más fuerte puñetazo dado sobre una mesa, mantiene una considerable distancia entre la madera y la mano, equivalente a varios radios atómicos. La fuerza que se ejercen ambos cuerpos en ese caso, es la de repulsión eléctrica entre los electrones de los átomos que se acercan (quizás en eso se base la excusa *¡Ni lo toqué!* esgrimida en algunos accidentes de tránsito). En distancias nanométricas, el concepto de estar o no en contacto se reemplaza por el más amplio de la comparación de las fuerzas de interacción entre átomos cercanos.

[13] El principio de funcionamiento del microscopio de efecto túnel se trató en el capítulo segundo. El de fuerza atómica tiene una punta que se acerca mucho a los átomos de la superficie de un material, de modo que éstos la atraen mientras se desplaza paralelamente a la superficie. La fuerza se mide por la flexión del fino soporte de la aguja.




El diámetro de un átomo es de aproximadamente 0,2 nanómetros. (El valor exacto depende de la clase de átomo.) Un nanómetro equivale, entonces, y aproximadamente, a la longitud que ocupan cinco átomos en fila.
Desde los comienzos del estudio de la estructura atómica, en el siglo XIX, se usa la unidad angstrom (Å), cuyo nombre honra la memoria del investigador sueco Anders Jonas Ångström (1814–1874). Un angstrom equivale a $10^{-10}$ metros; y diez angstrom, a un nanómetro.
La nanotecnología es, en suma, la manipulación de átomos individuales, o de pequeños grupos de átomos, como ciertas moléculas.

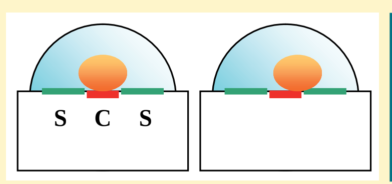


Engranaje diferencial, imaginado en el Instituto de Manufactura Molecular (IMM), California, en los Estados Unidos, con varias clases de átomos.

## Acelerómetros

Por lo dicho en relación con los efectos de los cambios de escala de tamaños, la aceleración, la gravedad y el peso tienen escaso efecto en la escala atómica, en la que predominan otras fuerzas mayores, como la eléctrica y la de Casimir.

Aún así, hay nanoacelerómetros,[14] útiles para medir aceleraciones muy grandes, como las que ocurren en impactos y explosiones. Lo más común en la industria es hoy el uso de microacelerómetros, de decenas de micrones hasta pocos milímetros de tamaño.




**Acelerómetro térmico. La bola de aire caliente, creada por un calefactor C, se mueve cuando el aparato se acelera, y los sensores térmicos, S, lo registran. Mide 1 mm, y da 10 mV por cada m/s² de aceleración.**

## Propuestas de estudio

**19.1.** ¿Cuánto vale la fuerza de Casimir para el caso de dos placas conductoras paralelas de un metro cuadrado de área, separadas a una distancia de un milímetro?

**19.2.** El relé electrostático descrito en este capítulo, actúa con una tensión dada por la siguiente fórmula, en la que *U* es la tensión en V; *d*, la separación entre la placa fija y la móvil, en m; *k* es la constante elástica en N/m; $\varepsilon_0$ es la permitividad del vacío o del aire (8,8541878176x$10^{-12}$ F/m); y *A* es el área de la placa. Con los datos ya mencionados en esa parte ¿Cuánto vale la constante elástica de la lengüeta móvil?

$$U = \frac{2}{3} d \sqrt{\frac{2kd}{3\varepsilon_0 A}}$$

**19.3.** Demuestren que la velocidad del sonido en un sólido es proporcional a la raíz cuadrada del cociente entre el módulo de elasticidad,[15] y la densidad del material. (Pueden usar argumentos basados en el análisis dimensional.)

**19.4.** Busquen, o generen, argumentos relacionados con la ética en nanotecnología, y relaciónenlos con la ética biotecnológica, un poco más antigua.

[14] Los que se ofrecen con ese nombre en el comercio de reproductores multimedia son, meramente, microacelerómetros, que sirven, en esa aplicación, para manejar el artefacto con sacudidas, en vez de pulsar botones o girar perillas.

[15] Al final del capítulo anterior se da una definición del módulo de elasticidad, cuyas unidades internacionales son las mismas que las de la presión: n/m$^2$, o kg /(s$^2$m).

## Otras fuentes de estudio e información

- Este sitio de Internet ofrece una introducción elemental a los microsistemas, con variados ejemplos de sensores radiativos, de flujo, sensores y microactuadores electrostáticos, magnéticos, térmicos y piezoeléctricos, y variados componentes electrónicos y de microsistemas. Su autor es el británico Danny Banks, y la versión castellana la realizó el mexicano M.C. Federico Sandoval-Ibarra.
*http://proton.ucting.udg.mx/tutorial/microsensores/susys_i.html*
- Artículo con animaciones que muestran nanoengranajes y nanocojinetes animados, y una nota sobre Raymond Kurzweil, un científico sobresaliente en varios campos, que alcanzó renombre por el acierto de sus predicciones en nanotecnología.
*http://www.taringa.net/posts/info/1788924/%C2%BFQue-son-los-Nanobots-y-Nanomaquinas.html*
- Explicación (en inglés) del diseño de un relé electrostático, por P. M Zavracky, de la Northeast University, Boston, Estados Unidos.
*http://www.ece.neu.edu/edsnu/zavracky/mfl/programs/relay/relay.html*
- Antonio Luque Estepa, Diseño de un acelerómetro basado en tecnología mems, *http://www.gte.us.es/ASIGN/SEA/MEMS_PRACT.pdf*. El autor describe la construcción, por métodos fotoquímicos, de un acelerómetro capacitivo de lengüeta sujeta por ambos extremos.

# ELECTRÓNICA

## Capítulo 20

# Electrónica y medio ambiente







Los mayores daños que sufre el ambiente por la fabricación y el uso de aparatos electrónicos, y por la generación y transporte de la energía eléctrica con la que funcionan y se fabrican, no son de origen electromagnético, como podríamos creer a veces, sino que provienen de la contaminación química y visual.
La electrónica es la rama de la industria que más velozmente avanza en la época actual, y en la que más rápidamente caen en desuso sus productos. Éstos, en pocos años, se convierten en basura, la cual, por desdicha, es de excelente calidad, y por eso, de muy difícil destrucción.
Arriba, millares de teclados y ratones estadounidenses en desuso, que algunas compañías reciben como parte de pago de equipos nuevos, para cumplir su obligación de hacerse cargo de ciertos desechos. Abajo a la izquierda, basural europeo con monitores en desuso. Muchos funcionan, pero se los cambió por otros más chatos, y de menor consumo.
En 2006, un tercio de la población mundial tenía celular; en 2009, dos tercios. Se calcula que se los renovará en tres años, aunque funcionen bien, y aparecerá entonces más de medio millón de toneladas de basura electrónica, para la que no hay un destino útil. A la derecha, toneladas de celulares chinos viejos, en proceso de destrucción, con aprovechamiento de algunas partes.
No hay, o son muy raros, efectos electromagnéticos causados por equipos eléctricos o electrónicos que dañen la salud humana, la animal, o la vegetal; pero sí pueden haber interferencias, cuya intensidad máxima regulan las leyes, para que no perturben el funcionamiento de aparatos vecinos.
Más que los aparatos en sí, lo que causa daños ambientales es la energía eléctrica que se consume para fabricarlos, cuando se obtiene a partir de la quema de combustibles, cuyos gases muy probablemente causen un calentamiento atmosférico, de efectos perjudiciales para la vida, la salud y la economía mundiales. Las partes más contaminantes de los aparatos son, hoy, sus pilas químicas, algunas de las cuales tienen sustancias nocivas, que pueden causar enfermedades si se dispersan, y si alcanzan una concentración suficiente.

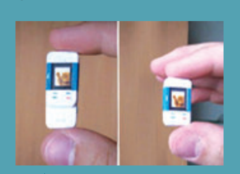
# Electrónica y medio ambiente



Las antenas de telefonía celular, debidamente instaladas a más de doce metros de distancia de un lugar habitable, no afectan la salud. Pero son feas. Quizás ésa sea, en el fondo, la razón por la que las critican individuos y organizaciones.

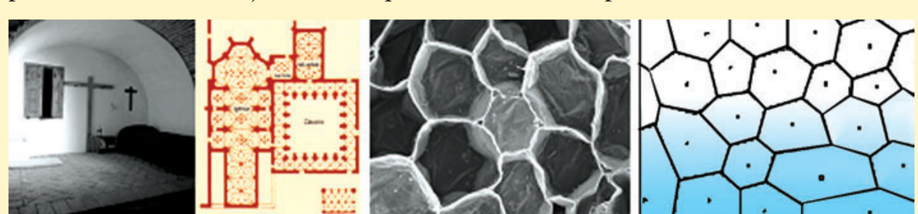


Teléfono móvil de 1978, con su pesada batería en la valija, y el más compacto "ladrillo" de 1995. Abajo, un pequeño celular de 2007. A medida que aumenta la cantidad de torres, disminuye la potencia necesaria para la comunicación.



En los últimos veinte años, el auge de Internet y la telefonía móvil multiplicó grandemente el volumen de las comunicaciones, y eso generó preocupaciones nuevas, por los posibles efectos de las ondas electromagnéticas en el ambiente, y en los seres vivos. Pero en realidad, y a pesar de ese aumento en el uso de la radiotelefonía, la irradiación electromagnética disminuyó, gracias a que una buena parte de las comunicaciones por aire[1] se realiza mediante la telefonía celular.

*Celular* significa concerniente o relativo a una célula. Y célula, en latín, es una celda pequeña, un compartimiento, como el de un monje en un monasterio, una celda de un panal de abejas, o una casilla en el tejido de un vegetal o un animal. La palabra la introdujo el biólogo Robert Hookes en 1665, para nombrar los compartimientos de los tejidos vivos que veía al microscopio.



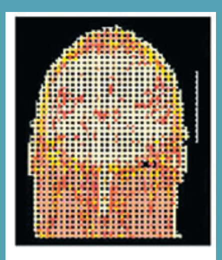
**Izquierda, celdas de un antiguo monasterio. Centro: celdillas (o células) vegetales, vistas al microscopio. Derecha: mapa de la telefonía celular en una ciudad. Cada punto representa una torre, y los polígonos, sus respectivas zonas de influencia, de uno o dos kilómetros.**

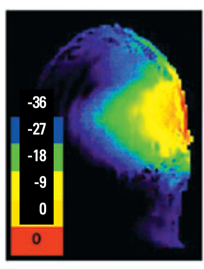
Antes de la telefonía celular, los aparatos móviles tenían que tener un alcance muy grande, porque la central telefónica podía estar a decenas de kilómetros de distancia. Empleaban para eso una gran potencia eléctrica, provista por baterías grandes y pesadas, que se llevaban en una valija. En consecuencia, la radiación electromagnética que recibía el usuario, y sus vecinos, era importante.

Actualmente, la telefonía inalámbrica requiere una potencia mucho menor, porque el aparato se comunica nada más que con la torre que corresponde a su célula, que raramente está a más de cuatro o cinco cuadras de distancia. Las torres se comunican entre sí, directamente, o por intermedio de satélites, hasta alcanzar el destino. Esas estaciones usan potencias mayores, pero no representan peligro,

[1] En la jerga de las comunicaciones, por *aire* se entiende el espacio público abierto, aunque se trate del vacío, o del agua en una comunicación submarina. Por ejemplo, en la transmisión de TV, se dice canal de *aire*, por oposición a un canal de cable, o de fibra óptica. A la *direct TV* no se la suele llamar de aire, a pesar de que sus ondas viajan por el espacio vacío y por la atmósfera, porque esa señal es reservada, y no pública.

porque están en lugares elevados, y alejados del público. La potencia eléctrica de la comunicación disminuye, así, centenares de veces.[2] Los usuarios de aparatos móviles, y las personas que los rodean, reciben una radiación electromagnética mucho menor que la de los transmisores portátiles de gran alcance, que se usaban hace veinte o treinta años.






Cabeza de muñeco, que imita la humana, junto a un celular que emite 125 mW. En rojo, cero decibel, correspondiente a 9,5 W/kg. En anaranjado, casi diez veces menos. El aparato cumple los límites higiénicos europeos, de 2 W/kg, y los norteamericanos, de 1,6 W/kg; pero sólo en relación con los órganos internos, ya que la piel y el hueso están excedidos (el capítulo 16 explica el concepto de decibel, o décimo de la unidad logarítmica).

## Radiaciones ionizantes y no ionizantes

Recordemos que ionizar significa cargar partículas con electricidad; por ejemplo quitarle electrones a un átomo; o, al contrario, dárselos en exceso. También se ioniza la materia cuando se desarma una molécula, en partes de carga opuesta.

Hay varias clases de radiaciones de efectos ionizantes; por ejemplo partículas aceleradas en un acelerador, partículas alfa y beta emitidas por un cuerpo radiactivo, y ondas electromagnéticas de longitud de onda menor de medio micrón, como la radiación ultravioleta del Sol, y los rayos gamma de la radiactividad.

Las radiaciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda son mayores de medio micrón (o frecuencia menor que $6 \times 10^{15}$ Hz), no son ionizantes; o lo son en muy pequeño grado. Son ejemplos la luz visible, los rayos infrarrojos, la radiación de los hornos de microondas, las ondas de telefonía, televisión, radio FM y AM, y los campos de las líneas eléctricas. En cambio, los rayos ultravioleta, X, gamma, y cósmicos, sí ionizan. Para expresar la intensidad de las radiaciones ionizantes se usan índices basados en su poder de ionización.[3]

[2] La potencia irradiada disminuye con el cuadrado de la distancia. Si en vez de enviar una señal a una central que está a 20 kilómetros, se la dirige a una antena que dista sólo medio kilómetro, como la relación entre esas distancias vale 40, la potencia necesaria para la comunicación se reduce en un factor 1600; eso ahorra un poco de energía; pero además, economiza mucho tamaño y peso de las baterías.

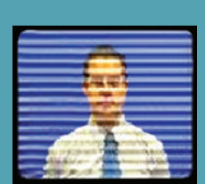
[3] Resumimos, para posibles consultas futuras, las principales unidades relacionadas con las radiaciones ionizantes. Una *actividad* de una desintegración por segundo, es de un becquerel (Bq). Un curie (Ci) equivale a $3{,}7 \times 10^{10}$ Bq; ésa es, aproximadamente, la actividad de un gramo de radio. Una *dosis de irradiación* de un rem *(roentgen equivalent man)*, genera $84 \times 10^{-4}$ joule de energía, y una carga de 258 $\mu$C, por cada kilogramo de aire que atraviesa. Un sievert (Sv) equivale a 100 rem. Cuando la radiación es gamma, o de rayos X, la unidad rem toma el nombre de roentgen, a secas. Una *dosis de absorción* de un rad, genera 0,01 J por kg de agua. Un gray (Gy), equivalente a 100 rad, genera un joule por kg de agua. Un sievert (Sv) equivale a un gray, pero corregido por la diferente sensibilidad de diversos tejidos y órganos a la radiación. La dosis de irradiación que recibe una persona por parte de las fuentes naturales es del orden de 1 ó 2 milirems por semana. El límite higiénico para los que trabajan con materiales radiactivos, u otras fuentes ionizantes, es de 200 milirems semanales, ó 100 veces la dosis de fondo o ambiental. Una radiografía irradia con 500 milirems. Con más de dos de ellas por mes, excederíamos el límite higiénico establecido por las autoridades. La dosis promedio que recibimos de los equipos de rayos X de uso médico es decenas de veces superior a la proveniente de las centrales nucleares, y de cualquier otro uso pacífico de la energía nuclear. Tanto la radiación de uso médico, como la proveniente de las centrales nucleares, son menos intensas que la radiactividad natural del ambiente. Una placa común de tórax implica, para el paciente, una dosis de 0,02 veces la milésima parte de un sievert, es decir, 0,02 mSv. Esto equivale a la radiación de fondo que todo ser humano recibe durante unos tres días, como consecuencia de las fuentes naturales (Reiteramos que las ondas de radio, TV, telefonía móvil, microondas y mandos infrarrojos, no son ionizantes; y si mencionamos aquí esa radiación, es para distinguirla de las ondas que emiten los equipos eléctricos y electrónicos.)



Dos watt por kilogramo elevan la temperatura del tejido vivo en un tercio de grado, por cada minuto de exposición. La leyenda de que se puede freír maíz con cuatro celulares, es falsa; hay truco.



Medición de la frecuencia de un horno de microondas, con una barra de chocolate fija, que no gire con el plato. Cuando aparecen zonas fundidas, se apaga el horno. Esas zonas son los *vientres* de la onda estacionaria que se forma, y la distancia entre ellas equivale a media longitud de onda. Las microondas se comportan como las ondas de sonido en una cavidad, y resuenan; esto es, interfieren con sus reflejos en las paredes. A partir de la longitud de onda, se calcula la frecuencia, con la fórmula de la nota al pie de esta página. También se pueden manifestar submúltiplos, como indica la figura.



Interferencia de un transmisor de radio de un coche, en la TV. A veces se oye también el sonido. Suele ocurrir cuando la antena está muy baja.

Aunque los rayos ionizantes son más peligrosos, los que no son ionizantes también pueden causar daños cuando son intensos, porque pueden calentar los tejidos vivos, y quemarlos, o colocarlos fuera del rango de temperatura vital.

Dentro de las radiaciones no ionizantes, o sea las de frecuencia menor que 600.000 GHz, se distinguen las de muy baja, baja, media, alta y muy alta frecuencia, cuyos efectos son diferentes. Las de muy alta frecuencia tienen escasa penetración en los tejidos; las de muy baja frecuencia los penetran, pero el cuer-po no las absorbe y las ondas siguen de largo. Las ondas de ciertas frecuencias intermedias ingresan al cuerpo humano, éste las absorbe, y los tejidos aumentan su temperatura. En este caso interesa la energía disipada en cierta masa del cuerpo, y en un cierto tiempo. En cambio, las ondas de frecuencia baja generan muy poco calor, y lo que interesa para la salud es, entonces, algún otro posible o hipotético efecto perjudicial que no sea el térmico; por eso se fijan otros parámetros como límite; por ejemplo la intensidad del campo eléctrico, o la del magnético, ya mencionadas en los capítulos 3 y 10.

La tabla 20.1 resume las frecuencias y longitudes de onda de las radiaciones electromagnéticas más comunes en la industria y la medicina.[4]

TABLA 20.1

| FRECUENCIA Hz | LONG. ONDA m | IONIZANTE | USO | EFECTOS EN EL CUERPO |
|---|---|---|---|---|
| $10^{2}$ | $10^{6}$ | No | Distribución de energía | Corriente débil |
| $10^{4}$ | $10^{4}$ | No | Radio AM | Corriente mayor |
| $10^{6}$ | $10^{2}$ | No | Radio FM, TV | Térmico débil |
| $10^{8}$ | 1 | No | Horno de microondas | Térmico mayor |
| $10^{10}$ | $10^{-2}$ | No | Mando infrarrojo | Fotoquímicos |
| $10^{12}$ | $10^{-4}$ | Sí | Cama ultravioleta | Altera células piel |
| $10^{14}$ | $10^{-6}$ | Sí | Radiografías | Daño celular |
| $10^{15}$ | $10^{-8}$ | Sí | Radioterapia | Daño celular |
| $10^{18}$ | $10^{-10}$ | Sí | Radioterapia | Daño celular |
| $10^{20}$ | $10^{-12}$ | Sí | Radioterapia | Daño celular |
| $10^{22}$ | $10^{-12}$ | Sí | Radioterapia | Daño celular |

El tipo de daños que produce una radiación se relaciona con su longitud de onda. Una onda del tamaño de una molécula puede desarmar una molécula, por ejemplo las del núcleo de una célula; una onda del tamaño de un átomo, desarma (o ioniza) un átomo; y para desintegrar el núcleo de un átomo, hace falta una onda de longitud diez mil veces menor, como el de ese núcleo, de unos $10^{-14}$ m.

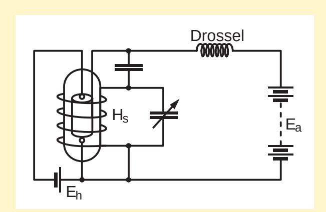
Los valores indicados en la tabla corresponden a los órdenes de magnitud, y no son exactos. Por ejemplo, la longitud de las microondas de un horno que opera con 2.450 MHz, es de 122 milímetros, y no de un metro como figura en la tabla 20.1;

[4] La frecuencia se relaciona con la longitud de onda mediante $\nu = c/\lambda$, donde $\nu$ (nu) es la frecuencia, en hertz, o 1/s; c es la velocidad de la luz, 288.792.458 metros por segundo; y $\lambda$ (lambda), la longitud de onda, en metros.

pero un metro es un valor más aproximado que los cien metros, o que el centímetro, de los renglones contiguos.



**Las cocinas de inducción desarrollan una potencia aproximada de 1 kW, que repartida en un área de 400 $cm^2$, representa una densidad de potencia de 2.500 $mW/cm^2$. Pero, como operan con 20 ó 30 kHz, sólo calientan los metales, pero no el cuerpo humano, ni otros cuerpos poco conductores, aunque induzcan corrientes de unos pocos microamperes. En cambio, sólo 5 $mW/cm^2$ de un horno de microondas, que funciona con dos o tres gigahertz, puede tener efectos de riesgo en el cuerpo humano. En la foto, sólo se fríe la parte del huevo que está apoyada sobre el metal. Las cocinas de inducción no agreden el medio ambiente.**




Los hornos de microondas emiten una radiación que, si incidiera en el cuerpo, causaría quemaduras internas. Se recomienda operarlos con la puerta cerrada, por si fallaren los interruptores de seguridad que interrumpen el funcionamiento en ese caso. Las ondas, de 2.450 MHz, las genera el *magnetrón*, un aparato con un filamento que emite electrones, acelerados con un electrodo de alta tensión positiva. En su trayecto, unos imanes hacen que los electrones se muevan en espiral, y al estar acelerados, emiten ondas electromagnéticas, que resuenan en cavidades, y salen por un orificio.

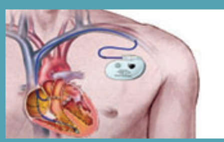
## Tasa específica de absorción (SAR)

SAR significa *specific absorption rate*, y se define como el cociente entre la potencia que recibe un órgano, y su masa. Se mide, por ejemplo, en miliwatt por gramo, en watt por kilogramo; o, lo que es lo mismo, en joules por kilogramo y por segundo. Esta magnitud se refiere a la energía recibida por un dado volumen de tejido, y en un cierto tiempo. Los organismos internacionales de salud establecen un límite higiénico para la SAR de radiaciones no ionizantes.

La SAR admitida depende de cada país y ámbito, y cambia con el tiempo, a medida que crecen los conocimientos, y mejora la tecnología. En caso de dudas, conviene respetar el criterio más exigente, que es seguramente el que entrará en vigencia en un futuro cercano.



Para la artritis y otras dolencias, los médicos pueden aplicar potencias electromagnéticas de 1 kW/kg, durante breve lapso. Arriba, equipo de onda corta Radarmed 2.500 CP, de 5 MHz, mil veces más potente que un celular.



Los portadores de marcapasos se deben cuidar de las radiaciones apenas un poco más que el público común, porque los aparatos actuales están bien protegidos contra interferencias electromagnéticas, especialmente los que suministran un ritmo fijo de estímulos cardíacos. Y los equipos más avanzados (cuyo ritmo responde a la demanda del organismo) operan momentáneamente con un ritmo fijo, en caso de anormalidades de funcionamiento, hasta que se supere la emergencia. Toda la precaución del portador se reduce a la de no apoyarse contra un horno de microondas, y guardar, preferiblemente, unos centímetros de distancia al artefacto.

## Densidad de potencia

La densidad de potencia S se expresa en watt por metro cuadrado ($W/m^2$); también en $mW/cm^2$, $mW/mm^2$, y, en general, en cualquier unidad de potencia dividida por unidades de área; o bien en unidades de energía, dividida por área y por tiempo. A diferencia de la SAR, la densidad de potencia es un índice de la energía que, en un cierto tiempo, atraviesa una dada superficie en el espacio, pase o no a través de tejidos.

La relación entre la densidad de potencia *S* y la tasa específica de absorción, *SAR*, depende de la frecuencia de la radiación, y del tipo de tejido vivo. Por ejemplo, si la frecuencia es cercana a la de un horno de microondas (2,45 GHz), concebido precisamente para calentar carne, o alimentos con bastante agua, como los tejidos humanos, la absorción es grande. En cambio, para la misma densidad de potencia, pero con una frecuencia cercana a la de la telefonía celular (0,8 a 2,1 GHz), la tasa de absorción es menos de la mitad.




Arriba, el Pibe Amarillo, personaje de Richard F. Outcault. En 1898 aparecía en algunos diarios sensacionalistas estadounidenses, que exageraban o inventaban noticias. De ahí surgió, quizás, el mote de *prensa amarilla*, que hoy merecen algunos sitios de Internet. La libertad de expresión permite propalar ideas infundadas, y hasta mentir a sabiendas dentro de ciertos límites. Es común oír que en un vecindario aumentaron las enfermedades después de la instalación de algún aparato. Para distinguir la verdad se necesitan datos confiables, comparados con los de otros tiempos y zonas.

## Límites recomendados en nuestro país

Los límites dependen de las profesiones, los tiempos de exposición, las frecuencias, y de otros criterios causantes de excepción; y cambian además con el tiempo. Una explicación completa de los reglamentos actuales ocuparía un espacio mucho mayor que el de este capítulo; pero igualmente damos valores de referencia, útiles para el diseño de equipos. Hacemos a la vez la recomendación de cumplir los reglamentos con un muy holgado margen, en previsión de una normativa más exigente que pueda adoptar la Argentina, o que impongan otros países que nos interesen como mercado para nuestras exportaciones.

La exposición *ocupacional*, referida a personas que trabajen a menudo con equipos que generen radiaciones electromagnéticas, en industrias que se suponen controladas por especialistas en riesgos profesionales, y para frecuencias entre 10 MHz y 300 GHz, la SAR, promediada en 6 minutos en la masa corporal total, no tiene que exceder nunca el valor de 0,4 W/kg, y tampoco debe exceder los 4 W/kg en ningún gramo localizado del cuerpo.



**Los instaladores de antenas receptoras están libres de riesgos de irradiación, porque trabajan con la potencia muy pequeña que llega desde lejos. Pero las antenas transmisoras, en algunos casos, pueden causar quemaduras.**

Para menos de 10 MHz, el límite de exposición depende de la frecuencia, y varía entre 5 y 100 mW/cm$^2$ Entre 30 y 300 MHz, banda que incluye la radio FM, la densidad de irradiación admitida es de 1 mW/cm$^2$ como máximo.

La exposición *poblacional*, esto es, la del público general que no está sujeto a un control de riesgos profesionales específicos, es diez veces menor que la prevista para los profesionales. No debe exceder 0,04 W/kg, promediada en su masa corporal, ni 0,4 W/kg localizada en un gramo de tejido; en ambos casos, computadas como promedios en un período de media hora.

Se recomienda que los valores instantáneos, o de pico, que se puedan producir, no excedan en un factor mayor de 100 los valores dichos.



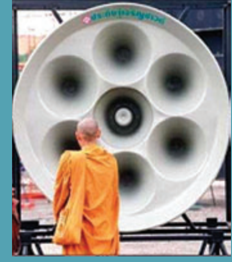
La torre de comunicaciones desentona con el estilo de las construcciones de Carmona, España. Pero sus pobladores necesitan sus servicios. Quizás, en un futuro, el dilema se resuelva con transmisores menos visibles.

| Frecuencia, *f* Hz | Densidad de potencia, *S* (mW/cm$^2$) | Intensidad del campo eléctrico, *E* (V/m) | Intensidad del campo magnético, H (A/m) | Tiempo medio *E*$^2$, *H*$^2$, *S* (minutos) |
|---|---|---|---|---|
| 30 a 100 k | - | 614 | 163 | 6 |
| 100 k a 3 M | - | 614 | 16,3 / f (MHz) | 6 |
| 3 a 30 M | - | 1842 / f (MHz) | 16,3 / f (MHz) | 6 |
| 30 a 100 M | - | 61,4 | 16,3 / f (MHz) | 6 |
| 100 a 300 M | 1 | 61,4 | 0,163 | 6 |
| 300 M a 3 G | f (MHz) / 300 | - | - | 6 |
| 3 a 15 G | 10 | - | - | 6 |
| 15 a 300 G | 10 | - | - | 616.000 / [f (MHz)]1,2 |

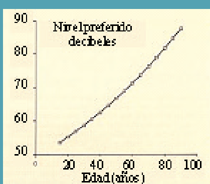
Además de esto, y en particular, los hornos de microondas, quizá las fuentes hogareñas más intensas de radiación electromagnética no ionizante, deben irradiar una densidad de potencia menor de 1 mW/cm$^2$ cuando están cargados de alimentos, o de 5 mW/cm$^2$ descargados; ambas medidas a 5 cm de distancia, y con la potencia del artefacto al máximo.

La última columna de la tabla anterior se refiere a los cuadrados de las intensidades de los campos magnético *H*, y eléctrico *E*, pero utiliza directamente la densidad de potencia *S*, sin elevarla al cuadrado. Eso se debe a que esta densidad es proporcional al producto de *E* por *H*, o al cuadrado de cualquiera de ellas, puesto que estas magnitudes se relacionan mediante $E = \mu_0 . c . H$, en ondas que se propagan en el vacío o en el aire. La constante c es la velocidad de la luz, 2.99792458 m/s; y $\mu_0$, la permeabilidad magnética del vacío, que vale $4\pi \times 10^{-7}$ N.A$^{-2}$, ó $4\pi \times 10^{-7}$ N.T/A.

El rango de 0,3 a 3 GHz (ó 300 MHz a 3 GHz) se conoce como UHF, siglas en inglés de ultra alta frecuencia; de 3 a 30 GHz es la SHF, súper alta frecuencia; y de 30 a 300 GHz, EHF extra alta frecuencia, o frecuencia extremadamente alta. esos nombres son históricos y convencionales, ya que el concepto de alto o muy



- Un parlante que emita un watt de sonido, cuando se lo oye desde seis metros de distancia, produce un nivel de cien decibeles, o sea de diez beles; $10^{10}$ veces mayor que el umbral de audi-ción, que es de $10^{-12}$ W/m$^2$. Hay parlantes de varios miles de vatios, diseñados para oírlos desde muy lejos en grandes espectáculos. Orientados hacia arriba, hacen saltar medio metro una bocha de dos kilos. Los espectadores cercanos sufren, a veces, heridas auditivas.




- Por la pérdida progresiva de la audición con la edad, el nivel de sonido que prefiere una persona sana aumenta con los años, como lo muestra el gráfico. Algunos jóvenes habituados a oír música de gran volumen, sufren en pocos meses pérdidas de sensibilidad auditiva que, normalmente, ocurrirían en cuarenta años.

alto, es relativo al valor tradicional con el que se operaba en la época en que se definió la nueva categoría.

Las mediciones realizadas en zonas densamente pobladas de nuestro país revelan valores reales diez veces inferiores a los límites higiénicos establecidos por ley, lo que muestra que las normas se pueden cumplir sin necesidad de hacer cambios grandes ni costosos, sino, simplemente, con la comprobación del buen funcionamiento de los equipos, y la reparación de los que se encuentren defectuosos.

## Agresión del paisaje

Las normas destinadas a preservar la calidad visual están a cargo de los municipios. Por ejemplo, en el partido de La Plata, provincia de Buenos Aires, se prohíbe la instalación de torres de comunicaciones en plazas, los edificios que las rodean, templos, escuelas, clubes, hospitales, e inmuebles catalogados con valor patrimonial; pero se permiten las antenas de los propios hospitales, y las de radioaficionados. Las normas cambian a menudo, y balancean el avance en los derechos de la población a vivir en un ambiente agradable a la vista, con las necesidades de satisfacer servicios que también demanda la misma población.

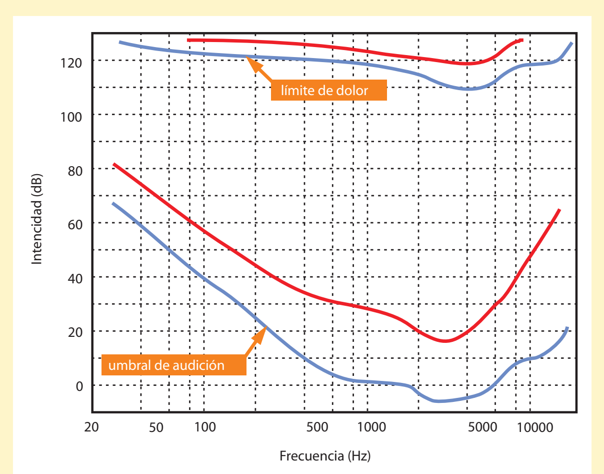
## Daños auditivos

Se critica, con razón, la costumbre de poner los equipos de sonido al máximo de su potencia, y la de combinar la emoción de la música con el aturdimiento, o saturación sensorial. Vemos eso en los coches de algunos aficionados, que en verano, y con las ventanillas abiertas, se oyen desde afuera como si fueran camionetas de propaganda. También ocurre en discotecas, donde esa modalidad ofrece a los danzantes una valiosa excusa para permanecer callados; y en equipos con auriculares, cuyas componentes más agudas, las de la percusión rítmica, se oyen desde más de un metro de distancia.

Esas prácticas son insalubres, porque producen una disminución crónica de la sensibilidad auditiva, que puede alcanzar los veinte decibeles; es decir, que oiremos cien veces menos que cuando éramos niños. Con esa reducción de respuesta, el oído se protege de daños mayores, pero pierde la posibilidad de oír sonidos débiles, que forman una importante parte de la voz humana, y es la que le da a veces matices y tonalidades sutiles, de alto valor emotivo y semántico, pero que sólo perciben oídos sanos.

Las recomendaciones laborales establecen un nivel sonoro máximo que no al-

cance los 85 decibeles para una jornada de ocho horas, y una reducción a la mitad de ese tiempo, si se trabaja sin protección auditiva, por cada tres decibeles adicionales. Resulta así que, como los auriculares más comunes permiten un volumen máximo de 110 decibeles (en Europa, 100), se los debería oír, a ese volumen, no más de un par de minutos por día. Pero los fabricantes sólo pueden recomendar, al diseñar y vender sus productos, que se los use con precaución; es del público libre, la responsabilidad de accionar adecuadamente la perilla.




**Curva de la audición humana. El oído tiene su máxima sensibilidad a los sonidos de frecuencia cercana a los 2 kHz. En negro, el oído normal; en rojo, un oído endurecido por la práctica habitual de exponerse a ruidos muy fuertes. El uso indebido de equipos de sonido es una de las fuentes importantes de daños de origen electrónico, a la salud y al ambiente.**

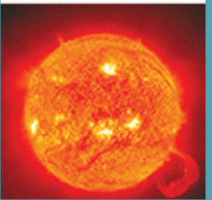
Si apoyamos en cierta posición un celular sobre una radio AM sintonizada a la izquierda del dial, se oye un ruido rítmico en el parlante, o en los auriculares de la radio, aun cuando no se estén haciendo ni recibiendo llamadas. La radio también emite un sonido, esta vez continuo, si se le acerca un reloj digital y se aprieta el botón de la luz de pantalla. Esos efectos ilustran la interferencia electromagnética entre aparatos.

## Interferencia electromagnética

Seguramente se habrá notado que, cuando se deja un celular apoyado sobre un televisor, una radio o una computadora, se oyen ruidos en los parlantes de esos equipos, o se ven perturbaciones en la imagen, especialmente cuando el aparato recibe una llamada. Esos efectos se consideran una *interferencia* de un aparato en el otro; en este caso leve, de solución inmediata, y sin consecuencias muy importantes. Las normas de cada país, y las internacionales, establecen límites a ese efecto, en resguardo del buen funcionamiento de los aparatos. Aun así, en los aviones se suele recomendar a los pasajeros que apaguen sus teléfonos y computadoras portátiles, especialmente en el momento del despegue y el aterrizaje, que son los más críticos del vuelo. Se pretende, con esa precaución, evitar posibles problemas de funcionamiento tanto en los equipos de comunicaciones de la nave, como en el de sus muchos aparatos electrónicos de vuelo.

El diseño de un equipo electrónico debe cuidar dos aspectos complementarios: que el aparato no cause interferencias, y que resista las interferencias de otros; en eso consiste la *compatibilidad electromagnética*. Eso es más difícil de conseguir en





Los rayos de las tormentas, y otras descargas atmosféricas, y la actividad solar, son fuente de interferencia en aparatos electrónicos, especialmente los de comunicaciones.

los aparatos de comunicaciones, puesto que están destinados a recibir ondas electromagnéticas, y a emitirlas; entonces no se los puede blindar del mismo modo en que se lo hace con un reproductor de música grabada. La protección contra interferencias tiene que distinguir entre el ruido y la señal, que a veces son de frecuencias muy cercanas, o iguales.[5] Los Estados Unidos de América fueron la primera nación en establecer límites, y en imponer estudios previos de influencia ambiental, en su Ley de Medio Ambiente de 1970.

Cualquier equipo electrónico es una fuente potencial de interferencia, tanto de los equipos cercanos en la misma vivienda, como en aparatos del vecino, afectados a través de las paredes medianeras. Las fuentes más intensas son las soldaduras de arco, los controles de corriente mediante triacs, los timbres de llamada muy antiguos, con contacto intermitente de lengüeta, los contactores de ascensores, y los trolebuses y trenes eléctricos con contactos deslizantes. El capítulo 10 mencionó la interferencia producida por el efecto corona, o ionización eléctrica del aire, en líneas de alta tensión. Esas perturbaciones aumentan inmediatamente después de las lluvias, y con la falta de mantenimiento de las líneas.[6]

El nivel de radiointerferencia se expresa en microvoltios por metro de intensidad de campo eléctrico.[7] Se suele especificar el valor máximo que puede producir un aparato, a una cierta distancia determinada distancia, y también el nivel que puede soportar el propio equipo, sin que presente anormalidades de funcionamiento.



**Sonda usada por el Laboratorio Ambulante de Mediciones de Campos Electromagnéticos y Ruido, de la Universidad Tecnológica Nacional de Santa Fe, para medir la radiointerferencia de la línea de transmisión de energía eléctrica de Paraná, de 132 kV.**



Joonhuyn Kim diseñó esta lámpara chata, que consume lo mismo que las redondas, y da la misma luz; pero ahorra espacio de almacenamiento y cartón de embalaje, con lo que reduce, indirectamente, el consumo de energía, y favorece, con eso, el medio ambiente.

## Riesgos ambientales indirectos de la industria electrónica

Se mencionó ya la emisión de campos y radiaciones –algunos de los cuales dañan la salud cuando exceden ciertos límites, o causan interferencias– y el perjui-

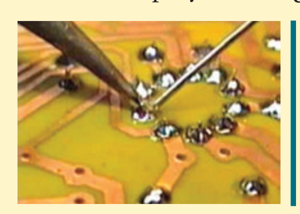
[5] En esos casos, una manera de separar el ruido de la señal, es codificar ésta, y usar información redundante. Como el ruido no redunda, se lo separa con mayor facilidad.

[6] El valor típico de ruido de radiointerferencia es de 110 dB debajo de las líneas, y de 80 dB a 50 m de distancia, con referencia a 1 μV/m. En cuanto al ruido audible, alcanza los 30 dB a 10 m. El Ente Provincial Regulador Eléctrico de Mendoza estableció, en 1999, para una línea, un nivel máximo de 54 dB durante el 80 % del horario diurno, a una distancia igual a cinco veces la altura de la instalación.

[7] Cuando esa magnitud se expresa en decibeles, hay que considerar cuál es el nivel de referencia de cero decibel, por ejemplo, un microvoltio por metro.

cio ambiental que representa la quema de combustibles fósiles para generar la energía empleada en la fabricación y el uso de aparatos electrónicos. Aparte de eso, debemos tener en cuenta también el daño ambiental que pueden causar los materiales usados en electrónica, y sus desechos.

La legislación más exigente, en los años actuales, es la de la Comunidad Europea, que influye directamente en todo el mundo, a través de los requisitos para el comercio internacional.[8] Las directivas del Parlamento Europeo limitan la canti-dad de materiales riesgosos que pueden contener los productos, o emplearse en su fabricación. La directiva 2002/95/CE resolvió la disparidad de normas locales de los países integrantes de esa comunidad, y limitó el empleo de sustancias contaminantes, como el mercurio, el plomo, el cadmio y el cromo. Sin embargo, apenas se comenzó a discutir su proyecto, surgieron dificultades insalvables, para la época actual del desarrollo de la industria electrónica; y se necesitaron excepciones, que recoge el cuerpo de la misma norma.[9]



**La soldadura con aleación de plomo y estaño, sigue siendo la principal forma de contacto fijo en los circuitos electrónicos. Se la desalienta, sin embargo, por la toxicidad del plomo.**

Por ejemplo, en los juguetes para niños no se permite el uso de pinturas con sales de plomo. Pero lo que llamamos estaño de soldadura, tan usado en electrónica para fijar las conexiones de los componentes, tiene un cincuenta o sesenta por ciento de plomo.[10] Si se prohibiera el uso de ese metal,[11] desaparecerían todos los aparatos electrónicos: celulares, MP3, relojes, televisores, cafeteras, alarmas de coches, computadoras y satélites. Entonces, y hasta hallar algo mejor, se lo permite en soldaduras, y como parte del vidrio de los tubos de TV.

También se permite el mercurio, en las lámparas fluorescentes rectas, si no sobrepasa los diez miligramos de halofosfato, los cinco de trifosfato de vida normal,




La preocupación por el envenenamiento con plomo es reciente. Desde hace un siglo, y hasta fines de la Segunda Guerra Mundial, era común regalar soldados de plomo a los niños varones, para que jugasen. Todavía hay muchas casas antiguas con caños de plomo para el agua potable, y a los instaladores de ca-ños se los sigue llamando plomeros. Pero el plomo metálico es menos venenoso que sus sales; por eso aún se lo permite en algunos usos, aunque se aliente la sustitución en las construcciones, y en los equipos nuevos.

---

8 Nuestros exportadores se deben comprometer ante sus clientes europeos no sólo a enviar a Europa productos que no dañen aquel ambiente, sino además a utilizar técnicas de producción que protejan también el entorno argentino. Por ejemplo, no hay que enviar contactos de cobre plateados por medios que hayan utilizado cianuro en los baños electroquímicos. La legislación extranjera influye, entonces, indirectamente, en la nacional.

9 Se exceptúa la obligación de sustitución, si ésta fuera técnicamente imposible, o de costo prohibitivo, o si sus efectos perjudiciales para el medio ambiente o la salud, superaran sus beneficios

10 El estaño puro, que funde a los 231,93 °C, es incómodo para soldar, lo mismo que el plomo puro, cuya temperatura de fusión es de 327,3 ºC. En cambio, una aleación de 61,9 partes de estaño y 38,1 de plomo, funde a los 183,0 °C, temperatura menor que la de cualquiera de los componentes. Esa mezcla se llama *aleación eutéctica*. Su bajo punto de fusión protege los componentes electrónicos de daños térmicos durante la soldadura (eutéctico, en griego, significa que se funde bien).

11 Cheung Shu-hung (1965–2007), uno de los dueños de la fábrica Lee Deer, se suicidó en Taiwán después de que más de un millón y medio de juguetes que había fabricado y exportado, se prohibiesen en todo el mundo, por el contenido de plomo de su pintura. El albayalde (en árabe *lo blanco*, carbonato básico de plomo, $(CO_3)_2(OH)_2Pb_2$, se usaba mucho en pintura, maquillaje y enfermería, hasta que a fines del siglo XX se desaconsejó su empleo, por sus efectos tóxicos cuando se lo ingiere.




Las líneas eléctricas libres de interferencia, admiten señales de telefonía, radio, TV e Internet. Arriba, un capacitor de acoplamiento, que aísla la baja la frecuencia de la red, pero conduce la alta frecuencia de la señal. La bobina de drenaje, de 6 u 8 espiras, cumple la función opuesta. Abajo, un inductor, apropiado para inyectar señales en los cables blindados subterráneos de las ciudades, sin contacto directo. Fotos de Arteche.)




y los ocho de trifosfato de vida larga. Es de imaginar el largo proceso de discusión con especialistas y fabricantes, para acordar esas cifras, compatibles con las actuales prácticas industriales.

Se permite también, y como excepción hasta tener materiales alternativos, el cromo hexavalente, y el cadmiado del hierro y otros metales, para protegerlos de la corrosión en los en los frigoríficos de absorción. En cambio, el cromado está absolutamente prohibido por esa directiva, y ya casi no se usa en el mundo.

## Propuestas de estudio

**20.1.** Muchos artículos y noticias sugieren que las torres de celulares causan cáncer. Las más potentes emiten 500 watt que, a diez metros de distancia, se reparten en unos mil metros cuadrados, y resulta así medio watt por metro cuadrado, o 50 microwatt por centímetro cuadrado. La Organización Mundial de la Salud admite que esas instalaciones irradien al público con densidades de potencia de hasta 400 microwatt por centímetro cuadrado; pero Italia y Rusia sólo aceptan diez de las mismas unidades. Las mediciones en Buenos Aires hechas hace pocos años por organismos de investigación de las Fuerzas Armadas arrojaron valores inferiores a siete microvatios por centímetro cuadrado. Por otra parte, el propio teléfono de mano puede emitir hasta 0,6 watt, que repartidos en cien centímetros cuadrados arrojan ¡seis mil microvatios por centímetro cuadrado! Pero cumplen la recomendación de la OMS, que admite que esos aparatos generen un máximo de 4 vatios por kilogramo de tejido humano. Comenten el porqué podría ser que abunden tanto los reclamos contra las torres, y escaseen las preocupaciones por los celulares, que irradian más el cuerpo.

**20.2.** Las denuncias públicas sobre supuestos peligros electromagnéticos, aunque carezcan de fundamento, introducen temor en la población, y disminuyó la demanda de compra de departamentos en edificios que tienen torres de telefonía celular, y en las vecindades. Eso originó demandas por parte de propietarios, quienes, aunque no creen que las torres produzcan realmente daños, ven igualmente disminuido el valor de su patrimonio, y piden que se los compense. Comenten el caso.

**20.3.** ¿A qué altura mínima debería estar la antena de una radio que transmite con una potencia de 25 kW?

**20.4.** ¿Por qué la luz de un horno de microondas, que es una radiación electromag-nética, atraviesa su puerta, y no lo hacen las propias microondas?

## Otras fuentes de información

- A. Portela, J.J. Skvarka, E.B. Matute Bravo, L.A. Loureiro, y colaboradores. *Prospección de radiación electromagnética ambiental no ionizante*. Es un manual de estándares de seguridad, elaborado por autoridades científicas de organismos oficiales argentinos de salud y de comunicaciones, en contacto con organismos de otros países, e internacionales.
*http://www.cnc.gov.ar/normativa/pdf/sc0202_95AI.pdf.*
- Ente Nacional Regulador de la Electricidad, especificaciones técnicas y límites de los campos electromagnéticos permitidos de radiación ionizante y no ionizante: *http://www.enre.gov.ar/web/BIBLIOTD.NSF/0/61350092a41e13d103256de5005eb4a4?OpenDocument*
- Conversión de unidades de dosis de radiación, en inglés, pero abundan las tablas de interpretación directa en cualquier idioma:
*http://www.stevequayle.com/ARAN/rad.conversion.html*
- Estudio sobre los efectos de los radares en la salud animal. Sus conjeturas se deben tomar con reservas, pero las explicaciones técnicas son claras y completas: *http://es.geocities.com/picolobo2002/efectoradar.html*
- César Arias, *Radiaciones ionizantes en el contexto de la seguridad e higiene en el trabajo*. Muy claro resumen de conceptos de radiaciones ionizantes, y de unidades de dosis.
*http://www.ingenieria.uba.ar/archivos/2006RadiacionesIonizantes.pdf*

# Respuestas a las Propuestas de Estudio

## Capítulo 1

**1.1** Éstos son los prefijos de múltiplos y submúltiplos usados en el ambiente científico.

| Prefijo | Símbolo | Factor |
|---|---|---|
| yotta | Y | $10^{24}$ |
| zetta | Z | $10^{21}$ |
| exa | E | $10^{18}$ |
| peta | P | $10^{15}$ |
| tera | T | $10^{12}$ |
| giga | G | $10^{9}$ |
| mega | M | $10^{6}$ |
| kilo | k | $10^{3}$ |
| hecto | h | $10^{2}$ |
| deka | da | $10^{1}$ |
| deci | d | $10^{-1}$ |
| centi | c | $10^{-2}$ |
| milli | m | $10^{-3}$ |
| micro | µ *(mu griega minúscula)* | $10^{-6}$ |
| nano | n | $10^{-9}$ |
| pico | p | $10^{-12}$ |
| femto | f | $10^{-15}$ |
| atto | a | $10^{-18}$ |
| zepto | z | $10^{-21}$ |
| yocto | y | $10^{-24}$ |

**1.2** La demostración se puede hacer de este modo: 1 V = 1 J/C; 1 J = 1 N.m. Sustituimos el joule por el newton metro, y dividimos ambos miembros por un metro, y queda: 1 V/m = 1 N/C, como se pedía.

**1.3** La chispa observada es del orden de un centímetro cuando se arriman puntas a la placa de aluminio; pero si se acerca un objeto muy redondeado para que el campo eléctrico sea más uniforme, la chispa mide sólo tres o cuatro milímetros de longitud. Por tanto la tensión antes de la descarga era de unos diez mil o doce mil volt, ya que el aire resiste unos tres kilovolt por milímetro.

## Capítulo 3

**3.1** Si se consumiera en un segundo la energía de un rayo de 500 millones de joule, la potencia desarrollada sería de 500 millones de watt. Como la Argentina usa 15.000 millones de watt, o sea treinta veces más potencia, un rayo sólo nos duraría la trigésima parte de un segundo. Hay rayos de energía mucho mayor, pero cualquiera de ellos duraría no mucho más de un segundo, si se lo aprovechase. La opción que consideramos correcta es la (a).

**3.2** Quince kilotones es la energía de quince mil toneladas de explosivo, o sea la de quince millones de kg de TNT. Cada kg disipa mil calorías; tenemos así quince mil millones de calorías, cada una de las cuales equivale a 4.185 joule. La energía total de una antigua bomba atómica (como las dos usadas en la segunda Guerra Mundial) es de $6{,}28 \times 10^{13}$ J. Por otra parte, cuarenta mil rayos de 500 MJ cada uno, representan una energía de $2 \times 10^{13}$ J. Entonces, una bomba equivale a tres tormentas; la opción que creemos correcta es la (d).

**3.3** Ese invento del paraguas con pararrayos es todo lo ridículo que parece. La energía de un rayo es tan grande que volatilizaría la conexión a tierra, especialmente en la zona de contacto poco firme con el suelo. Además alguien podría pisar la tira de descarga, y hacer caer el paraguas. Su uso respondió quizás a una moda, o a lo mejor se usó como

distintivo político festivo en favor de las ideas independentistas de Franklin.

**3.4** Si dividimos por seis metros la tensión de 13.200 V, tenemos un valor aproximado de la intensidad del campo eléctrico; 2.200 V/m; o sea 2,2 kV/m, inferior al límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud.

## Capítulo 4

**4.1** La conexión 4 mide la tensión; la 5 y la 9 miden la corriente, y la 8 produce un cortocircuito, además de arruinar, quizás, el instrumento. Las demás conexiones no miden nada útil; y algunas, nada en absoluto.

**4.2** La persona desarrollaría, en el primer caso, una potencia de un watt, semejante a la del corazón. En el segundo caso, más de un kilowatt.

**4.4** La resistencia de ese aparato vale 16,13 Ω; la corriente es de 13,64 A.

**4.5** El gráfico que mejor representa la ley de Ohm es primero, el de la recta que pasa por el origen de coordenadas.

**4.6** Aparte de cuestiones gramaticales o de estilo, ambas expresiones son técnicamente desacertadas; deberían haber dicho kilowatt hora por bimestre, y más kilowatt, respectivamente. Los físicos dieron un nombre propio a una unidad de potencia, y como tiene nombre, muchos creen que es un bien de consumo. Pero aquello por lo que se paga es el kilowatt hora (un kilowatt hora equivale a 3.600.000 joule, o bien a 860,2 kilocalorías).

## Capítulo 5

**5.1** El neutro es, en ese caso, el cable negro, porque es el único que tiene una tensión de 220 V con respecto a los otros tres cables.

**5.2** Correcto: *"...un aumento en la tarifa para hogares que consumen más de 1.000 kilowatt hora por bimestre."* (Din€ro, Argentina, http://www.mdzol.com, 31.Oct.1998). Incorrecto: *"Apuestan por un sistema tarifario progresivo que ligue más el precio del kilowatt al nivel de consumo."* (El Mundo, España, http://www.elmundo.es,19.Ago.2003.) El bien de consumo es el kilowatt hora, unidad de energía. El kilowatt es unidad de potencia, equivalente al consumo de un kilowatt hora por cada hora transcurrida. (¿Difícil, verdad? ¡Sin duda! También para políticos, periodistas y funcionarios.)

**5.3** Hay variantes más sencillas en http://farm1.static.flickr.com/198/452307988_25daba84f2.jpg, en la que el contacto es por apoyo de un alambre al que le quitaron el esmalte de un lado, y se lo dejaron intacto en el costado opuesto.

**5.4** De esos datos se deduce que Aluar produce cerca de 180 mil toneladas anuales de aluminio (eso está en aumento).

**5.5** Un gigawatt hora por año es una potencia pequeña, apenas 114 kilowatt, ó 0,114 megawatt, la que se desarrolla en un edificio de veinte departamentos.

**5.6** En cada hora de parada la compañía generadora pierde 130.000 pesos, que ahorran los consumidores, quienes pierden mucho más, por no poder producir.

**5.7** El riesgo de muerte por choque eléctrico con 220 V es algo mayor que con 110 V, pero mucho menos del doble. Con 220 V la corriente es la mitad; gracias a eso disminuye el grosor de los cables y barras, y el calentamiento de los enchufes. La Argentina tomó decisiones acertadas en 1900 y en 1930, aunque estuvieran motivadas, entonces, por razones de ahorro.

## Capítulo 6

**6.1** Algunos marginales sienten que destruyen bienes que les han sido arrebatados. Su inclusión en la educación, el trabajo y el ocio es el primer paso de solución. Y para quienes sólo sufren primitivas ansias de diversión, algunas compañías cuelgan de las torres campanas de acero de colores vivos, para que los inmaduros les disparen a gusto.[1]

**6.2** La sección transversal es de 1,54 $mm^2$; y el diámetro, 1,24 mm.

**6.3** El aluminio tiene una conductividad de 65 IACS.

**6.4** El oro de una computadora vale dólar y medio. Y si se ponen dos micrones de níquel y, sobre este metal sólo un micrón de oro, el costo del oro se reduce a la mitad.

**6.5** Un milímetro equivale al calibre 18 de la galga estadounidense.

[1] La palabra vándalo se relaciona con Al–Ándalus, el nombre árabe de Andalucía durante la Edad Media, cuando algunos fanáticos destruían estatuas, porque su religión les prohibía la veneración de ídolos.

## Capítulo 7

**7.1** No la hay. Las palabra imán proveniente del árabe significa el que está al frente, y tiene raíz diferente de la que designa los objetos con magnetismo permanente.

**7.2** No la tienen. Su único efecto es el de retener posibles partículas de hierro, que quedarían de todos modos, en alguno de los filtros habituales de los coches. También son inciertos los posibles efectos curativos de las pulseras magnéticas. El hecho de que los imanes ejerzan fuerzas sin necesidad de un contacto promueve, quizás, especulaciones mágicas.

**7.3** Es porque así hacen más fuerza, ya que las líneas de campo pasan directamente del imán al hierro de la puerta, sin atravesar el aire, que es mucho menos permeable.

**7.4** La respuesta es negativa. Ese armado sólo ocultaría de la vista los polos sur de los doce imanes, sin alterar las fuerzas que hacen sobre otros, o a brújulas. Ese dodecaedro quedará sin magnetismo neto.

**7.5** El propio cable le hace demasiada fuerza. Distinto caso es si se lo cuelga de un hilo delgado; entonces se orienta más libremente.

**7.6** Alcanza con aproximar ambos cuerpos; y mejor, hacer que se toquen, y hasta que se golpeen. La idea de que hay que frotarlos proviene de prácticas electrostáticas. En la película *Al filo del peligro* (The Edge, Lee Tamahori, 2006) un personaje frota una aguja con un paño, para improvisar una brújula. Eso es errado; la frotación con una tela no magnetiza cuerpos. Además, una aguja sirve de brújula, aunque no la magneticemos especialmente, porque el propio campo terrestre la induce.

## Capítulo 8

**8.1** Un tesla equivale a diez mil qauss, y un gilbert, unidad de fuerza magnetomotriz, es igual a 0,796 ampere vuelta; exactamente, 1 G = $10/(4\pi)$ A.

**8.2** No sólo por la imaginación, sino por haber desarmado una, sabemos que esa linterna funciona con una rueda de imanes que gira frente a una bobina con núcleo de hierro.

**8.3** La fuerza vale 160.000 newton, más de 16 toneladas. Para evitar daños destructivos en esa eventualidad, envainan cada conductor en un tubo de aluminio grueso, una de cuyas marcas comerciales es *Miniflux*. La corriente que circula por el tubo es opuesta, en cada instante, a la del conductor principal, y eso minimiza la densidad de l flujo magnético.

**8.4** Elegimos, sin nada que nos obligue, hacer un solenoide de 20 cm de largo, e igual medida de diámetro; o sea $R = 0{,}1$, y $L = 0{,}2$ m. La inducción $B$ es de 0,000 016 T; y la corriente es $I = 0{,}1$ A. Despejamos el número de vueltas de la fórmula de la inducción del solenoide, y resultan 25 espiras.

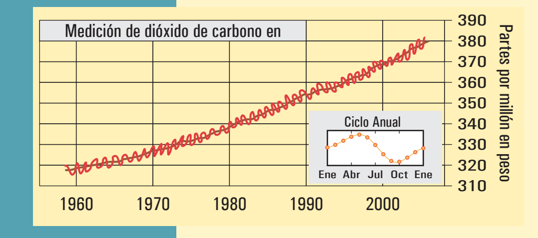
**8.5** La tensión entre los puntos de color de los secundarios del primer transformador, es de 75 V. En el de la derecha, de 25 V.

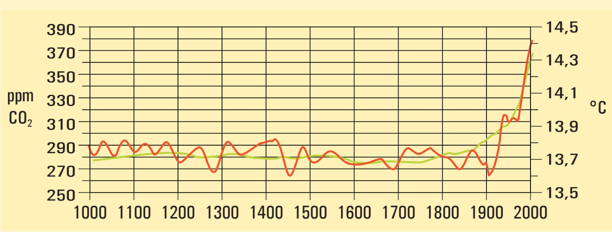
## Capítulo 9

**9.1** Si la Tierra fuera rígida, podríamos responder afirmativa o negativamente. Pero como es blanda, y los continentes se mueven y cambian de forma, esa pregunta carece de significado. Los conceptos de ciudad, isla y continente tienen sentidos efímeros, en relación con los tiempos geológicos.

**9.2** Para imanes permanentes se requiere una histéresis elevada. La pieza que se calentará mejor en un horno de inducción será aquélla que tenga una mayor histéresis magnética.

**9.3** La pinza amperométrica es un transformador en el que el primario está compuesto por una sola espira, el cable por el que pasa la corriente, generalmente alta, que se quiere



medir. Por el secundario, de muchas vueltas, pasa una corriente proporcionalmente menor, que mide un instrumento de aguja o un amperímetro digital. el núcleo del transformador se puede abrir y cerrar fácilmente para abarcar el cable. Las pinzas basadas en ese principio se usan en corriente alterna, pero hay otras apropiadas para medir corriente continua, basadas en sensores de efecto Hall, o en la superposición de un flujo alterno que genera un circuito, con el flujo continuo que genera la corriente continua que se mide.

**9.4** La respuesta es, por desdicha, negativa. Si los alambres son muy delgados, la densidad de corriente (por ejemplo en ampere por centímetro cuadrado) será muy elevada, y seguramente mayor que la crítica que admite el material superconductor.

**9.5** Es posible, siempre que esa materia contenga hidrógeno, u otro elemento químico de espín diferente de cero.

**9.6** Funciona, pero la aguja no acompaña regularmente la rotación del vehículo, porque la gran masa de hierro distorsiona el campo terrestre.

## Capítulo 10

**10.1** La inclusión del cero quita espectacularidad. Algunos diarios ponen: *¡Abrupta caída en la Bolsa!*, y muestran un gráfico con un gran escalón descendente, pero que sólo significa que las acciones cayeron de 100 a 99,6.

**10.2** La respuesta es (e). La inversión en el acondicionador de aire es grande, en comparación con la de la compra de una estufa.

**10.3** Si la lámpara es de 25 W y permanece encendida ocho horas diarias; y si la tostadora es de 1 kW y se la usa diez minutos diarios, gasta más la lámpara: 200 W.h diarios, mientras que la tostadora consume sólo 167 W.h por día. Eso equivale hoy a 1,8 y 1,5 pesos por bimestre, respectivamente.

**10.4** Unos 1.300 kilómetros por segundo.

**10.5** La aceleración de esa partícula es de $1{,}7 \times 10^{11}$ m/s$^2$.

**10.6** La inducción vale diez militesla.

**10.7** Si la reducción de la tensión es deliberada, y si el caso referido es habitual y extendido, resulta una situación irónica, en la que se intenta reducir el consumo, pero se consigue justamente lo opuesto. En cualquier caso, conviene reemplazar los artefactos comunes por otros de arranque electrónico, más eficientes, y que también funcionan cuando la tensión de la red es baja.

## Capítulo 11

**11.1** La cuenta es $200 \times 736 / 18.000 \times 500 \times 10^6 = 4 \times 10^{10}$ W; ó 40 gigawatt. Para hacer funcionar, fantásticamente, esa supuesta máquina, haría falta el triple de la potencia eléctrica desarrollada en toda la Argentina.

**11.2** El factor $\mu$ vale 200; y la transconductancia s, 0,19 S (la primera cantidad no lleva unidades, la segunda está en siemen, antiguamente en mho).

**11.3** En tal caso, la grilla no detendría ni controlaría el flujo de electrones, que estaría compuesto por la totalidad emitida por el cátodo. No habría amplificación.

**11.4** Las semejanzas son que las dos, válvula y fototubo, son tubos de vidrio al vacío; ambas tienen ánodo y cátodo; en los dos aparatos circulan electrones a través del vacío desde el cátodo hacia el ánodo; y los dos inventos corresponden a momentos históricos cercanos en el tiempo. Las diferencias, que una tiene cátodo frío, y la otra caliente; la fotocélula tiene un a placa como cátodo y un alambre delgado como ánodo, mientras que en la válvula ocurre lo opuesto; y la válvula sirve para rectificar corriente alterna, mientras que la fotocélula se emplea para detectar luz.

**11.5** Arco voltaico, luz eléctrica, lámpara de filamento; uso de lámparas incandescentes; rayos X; relatividad; 1GM; triodo; pentodo; computadora electrónica; 2GM; bomba atómica; MP3.

**11.6** Una prueba muy simple es encender la lámpara durante algunos segundos, y tocar la ampolla. Si está más caliente arriba que abajo, es que adentro hay gas que entró en convección, o sea que subió el gas más caliente, y bajó el más frío. Otra prueba sería romper la lámpara, sumergida en un balde con agua. Si suben burbujas, es que había gas y no vacío. Otra prueba: se calienta la ampolla en la llama de una hornalla. Si el vidrio se hunde al ablandarse, es que adentro hay vacío. Si en cambio se levanta una am-

polla, hay gas *(advertencia: Los trozos de vidrio de la ampolla de la lámpara son cortantes, y podrían causar daños personales. Si se hacen las dos últimas pruebas, se recomienda el uso de guantes y anteojos).*

## Capítulo 12

**12.1** Para proteger ese voltímetro, se le pueden poner dos pequeños diodos de silicio en paralelo, y en polaridades opuestas. Para tensiones de medio volt, o menores, los diodos no conducen, y el voltímetro opera normalmente. Para tensiones que superen 1 V, los diodos conducen, y limitan la tensión a ese valor, o poco más. Si la tensión errónea fuera muy grande, actuaría el fusible. El resistor no afecta mucho la indicación del voltímetro, y protege los diodos del exceso de corriente.

**12.2** El diodo Shokley, o diodo de cuatro capas, cuyo símbolo es el de la figura, presenta una alta resistencia eléctrica en el sentido directo de conducción, pero cuando se supera un cierto valor de tensión, la resistencia del diodo disminuye abruptamente. Esa propiedad es útil para producir pulsos de corriente que disparan otros circuitos; o, si se carga un capacitor a través de un resistor en serie, y se lo descarga sobre un diodo Shokley, se obtiene un oscilador. Eso sirve, entre otras aplicaciones, para generar señales de radio con los llaveros que cierran las puertas de los coches, y activan la alarma, desde unos metros.

**12.3** El costo de la energía que consumen esos tres tipos de lámparas es de ocho pesos, uno con sesenta, y cincuenta centavos bimestrales, respectivamente. Las lámparas de leds son energéticamente ventajosas.

**12.4** La anormalidad obedece a que los diodos no son conductores perfectos en el sentido directo. Se comportan como aislantes hasta alcanzar la tensión directa de conducción, apenas inferior a la de la pila, y a partir de ella producen una caída de aproximadamente un volt por diodo.

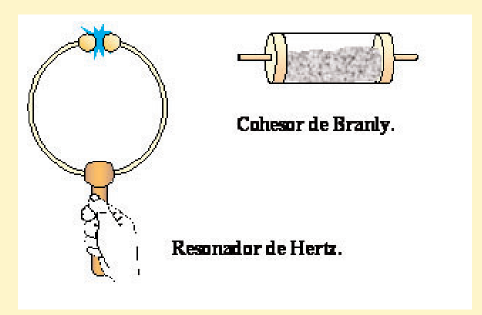
**12.5** El gráfico correcto es el b. Esa conexión de dos diodos Zener en oposición y en serie, *espalda contra espalda* (*back-to-back connection*), se conoce como circuito *recortador*, o *clipping circuit*.

## Capítulo 13

**13.1** El coeficiente beta de ese transistor vale aproximadamente 34. Para deducirlo, elegimos un valor cualquiera de la tensión entre el emisor y el colector, por ejemplo $V_{CE} = 3$ V, y dos valores cualesquiera de la corriente de base, por ejemplo $I_B = 20\ \mu A$ e $I_B = 120\ \mu A$, y nos fijamos en el gráfico a qué corrientes de colector corresponden.
Son $I_C = 0{,}8$ mA e $I_C = 4{,}2$ mA, o bien 800 y 4.200 microampere, respectivamente. Hacemos la cuenta (4.200–800)/(120–100), y nos da 34: ése es el factor beta, o de amplificación.

**13.2** Eso es imposible. Los coeficientes alfa y beta están relacionados con las fórmulas de la página 158 de este libro; si se sabe cuánto vale uno, se deduce cuánto vale el otro.

**13.3** Las ondas electromagnéticas fueron predichas, teóricamente, por James Clerk Maxwell en 1864, y generadas y detectadas[2] por Heinrich Hertz en 1886. Para generar las ondas, hizo saltar chispas eléctricas. Para detectarlas, usó un aparato llamado *resonador*, que consistía en un aro con una abertura entre esferas. Cuando el resonador detectaba ondas, saltaban chispas entre las esferas. En 1884 Édouard Eugène Désiré Branly inventó un aparato que llamó *cohesor*, formado por un tubo de vidrio con lima-




[2] En rigor, y después del descubrimiento de Maxwell, cualquiera que encendiese una vela podía alardear de haber generado ondas electromagnéticas; y cualquiera que viese la llama podía decir, sin faltar a la verdad, que había conseguido detectarlas; puesto que la luz no es otra cosa que una onda electromagnética. Cuando hablamos de generar y detectar ondas electromagnéticas, nos referimos a fenómenos aparte de los luminosos.

duras sueltas y flojas de hierro y plata en su interior. Cuando llegaban ondas electromagnéticas, las partículas metálicas se acomodaban, y hacían buen contacto. Para usarlo por segunda vez había que sacudirlo, para que las partículas se desacomodaran.

**13.4** La versión es teóricamente posible. Para almacenar un millón de millones de bytes, u 8 terabits, se requieren 16 billones de transistores, que si fueran del tamaño de un átomo, ocuparían un volumen total de $16 \times 10^{12} (10^{-10}\ m)^3$. Si a ese volumen le extraemos la raíz cúbica, tenemos el tamaño lineal del microcircuito; menos de tres micrones. El tiempo que tarda la luz en recorrer esa distancia es de $8{,}4 \times 10^{-15}$ segundos; por tanto en un segundo la luz puede ir y volver de un extremo a otro del procesador $0{,}6 \times 10^{14}$ veces, más veces que las declaradas, $10^{12}$ por segundo. Pero no sabemos si ese aparato ya se ha construido, esto es sólo una especulación de posibilidad teórica, pasa por alto las dificultades constructivas, y la disipación del calor.

**13.5** La función de ese resistor es la de evitar que circule una corriente excesiva por las bases de los transistores, que podría dañarlos. Por ejemplo, si ese resistor fijo no estuviera, y si, con la intención de conseguir que la lámpara encienda apenas cae la tarde (y no bien entrada la noche), alguien pusiera el potenciómetro en su posición extrema izquierda, por las bases de los transistores circularía una corriente sólo limitada por la resistencia de la bobina del relé.

## Capítulo 14

**14.1** Sí se puede; de hecho un triac equivale a dos SCR. Pero en el caso de los dos diodos controlados, es necesario unir las dos compuertas en un único electrodo de control.

**14.2** Esa marca rompe la simetría y permite identificar las patas de conexión, y distinguir las del led de entrada, de las del fototransistor de salida.

**14.3** En tal caso, el aparato pierde toda su sensibilidad, porque ese plástico tiene unas lentes, y sin ellas no se forman imágenes sobre el sensor, cuyas dos mitades recibirán, en ese caso, igual radiación.

**14.4** Tiene una banda marrón, otra negra y otra verde. La cuarta banda, si es dorada, indica una tolerancia del cinco por ciento.

**14.5** La respuesta es negativa. Los atenuadores de triac se basan en el control del ángulo, o fracción del período, en el que el componente conduce la corriente eléctrica. Con la batería de tensión continua la corriente no pasará por cero, entonces el atenuador mantendrá la luz siempre encendida, o siempre apagada.

## Capítulo 15

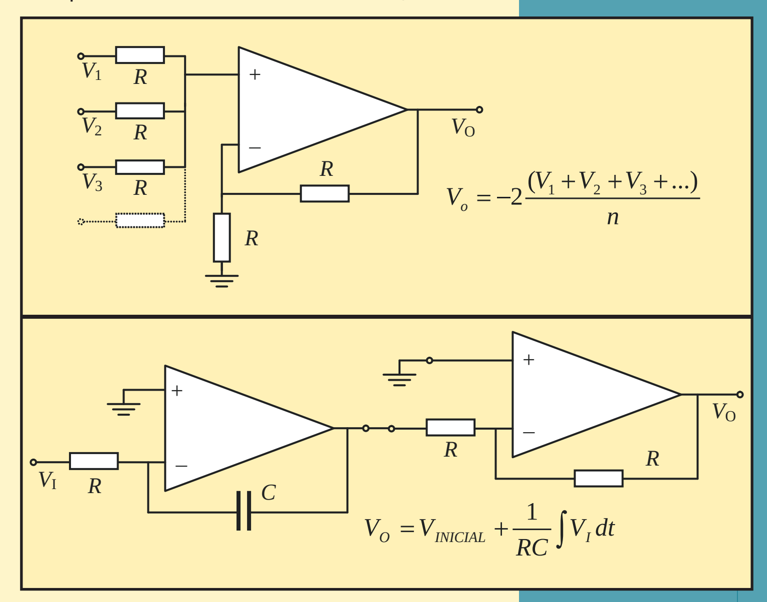
**15.1** La tensión de salida vale +12 V. La trampa consiste en haber hecho el circuito con realimentación positiva en la entrada directa, cuando la conexión correcta debe tener realimentación negativa.

**15.2** La tensión de salida es de 10 V, puesto que la ganancia del amplificador vale $100.000 \div 10 = 10.000$.

**15.3** En tal caso, la tensión de salida sería de –12 V. La aplicación irreflexiva de la fórmula arroja –30 V, pero el operacional no puede entregar más tensión que la que recibe como alimentación.

**15.4** La figura da la respuesta. La fórmula es algo más compleja que la del sumador inversor. El número n representa la cantidad de tensiones que se suman.

Para interpretar el circuito, consideremos que las entradas no toman corriente; enton-



ces en la entrada directa aparece una tensión igual al promedio de las tensiones que hay en los otros extremos de los resistores. En la entrada inversora la tensión es la misma, y además vale la mitad de la tensión de salida, porque está tomada del punto medio de una serie de dos resistores de igual resistencia, conectada entre la salida y tierra.

**15.5** Para obtener un integrador sin inversión existen soluciones con un único amplificador operacional; pero por sencillez de interpretación, proponemos el uso de un integrador inversor, con el agregado, a la salida, de un amplificador inversor de ganancia unitaria.

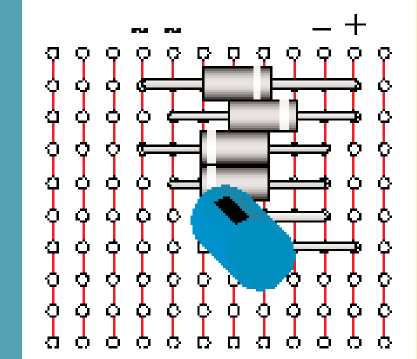
## Capítulo 16

**16.1** Pueden obtener la respuesta por dos métodos diferentes; uno es hacer el cálculo, y el otro consiste en extraer el dato de la escala del multímetro reproducida en este capítulo, sin hacer cuentas.

- *Esa tensión de 220 V equivale a 49 decibeles. La cuenta es:* $10 \times \log_{10}((220/0{,}775)^2)$, *donde* 0,775 V *sale de* $\sqrt{(0{,}001\ mW \times 600\ \Omega)}$.

**16.2** Una forma de conseguir lo pedido, es la de la figura. Las líneas onduladas indican la entrada de la tensión alterna, y los signos + y –, la salida de continua filtrada.

**16.3** Naturalmente, el multímetro marca menos tensión de la que hay entre los bornes de la batería, porque está el resistor de un megohm en serie, y en él se produce una importante caída de tensión. Las resistencias del multímetro en cada escala valen, respectivamente, y según lo dicho en la página 3 de este capítulo, 50 kΩ, 1 MΩ, 5 MΩ y 20 MΩ. Las tensiones leídas valen $U_L = 9\ V \times R/(R + 1\ M\Omega)$; y eso da, para cada uno de los valores de la resistencia interna del multímetro, 0,43 V; 4,5 V, 7,5 V y 8,57 V. Es sorprendente, para quien experimenta ese efecto por primera vez, que la tensión medida depende de la escala en la que se encuentra el instrumento; eso indica a las claras que hay una gran resistencia en serie.

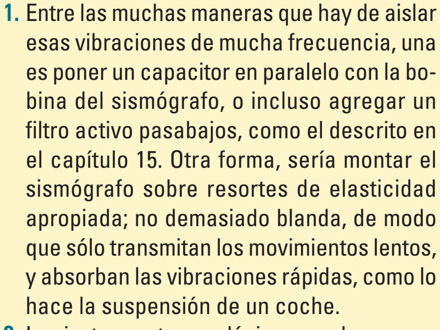



1. Entre las muchas maneras que hay de aislar esas vibraciones de mucha frecuencia, una es poner un capacitor en paralelo con la bobina del sismógrafo, o incluso agregar un filtro activo pasabajos, como el descrito en el capítulo 15. Otra forma, sería montar el sismógrafo sobre resortes de elasticidad apropiada; no demasiado blanda, de modo que sólo transmitan los movimientos lentos, y absorban las vibraciones rápidas, como lo hace la suspensión de un coche.
2. Los instrumentos analógicos muchas veces dan más información que los digitales. Por ejemplo, si ponemos un multímetro en la escala de 50 V y le aplicamos 220 V, la aguja dará un salto muy brusco, y nos dirá que excedimos en mucho el rango. Hasta es posible que sintamos en la mano el golpe de la aguja contra el tope de la escala. Un instrumento digital sólo indicará, con algún signo, el rango excedido. Aparte de eso, si una tensión aumenta al doble, veremos cómo la aguja duplica su ángulo con respecto al cero. Un aparato digital nos dirá lo mismo, pero hay que pensar, e interpretar los números que indica. Otro ejemplo: si seleccionamos una escala de tensión continua y aplicamos alterna, la aguja se verá borrosa, por las vibraciones. El aparato digital marcará cero, o valores erráticos, sin tanta información.

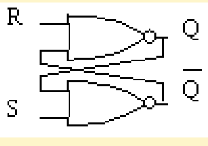
## Capítulo 17

**17.1** Binario: 0, 1, 10, 11, 100, 101, 110, 111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111, 10000, 10001, 10010, 10011, 10010. Tetral: 0, 1, 2, 3, 10, 11, 12, 13, 20, 21, 22, 23, 30, 31, 32, 33, 100, 101, 102, 103, 110. Octal: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24. Hexadecimal: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F, 10 ,11, 12, 13 , 14.

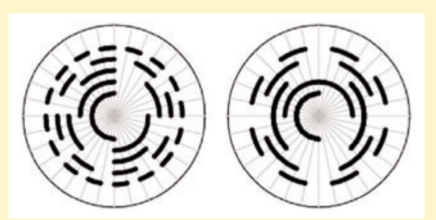
**17.2** El valor lógico de salida es igual a 1. la compuerta AND de arriba a la izquierda cumple la condición de entradas, entonces entrega un 1 a la salida, y eso hace que la compuerta OR, de la derecha, provea un 1, no importa qué es lo que haga la compuerta AND de abajo.



**17.3** Supongamos que Q es verdadera; entonces la compuerta inferior tiene activa una entrada. Por consiguiente, su salida es falsa. Si no se alimenta R, la compuerta superior confirma su valor verdadero de salida. Lo mismo ocurre con la suposición opuesta. Pero cuando entra una señal por R, la salida de la compuerta superior cae a cero, lo que hace que se active la salida de la compuerta inferior. Los comandos Set y Reset actúan, en este caso, como directos, y no con inversión.




**17.4** El disco de la derecha responde al código Gray, porque no hay ningún radio que toque a la vez dos extremos de segmento angular.



**17.5** En tal caso, enciende el signo del dígito siete.

## Capítulo 18

**18.1** De acuerdo con la fórmula dada en el capítulo, la fuerza vale 8,85 N, casi un kilogramo.

**18.2** La fuerza hallada, repartida en un área de 0,0001 $m^2$, representa una presión de 88.500 pascales, ó 0,0885 megapascales. La relación entre ese valor y el módulo de elasticidad, es del cuatro y medio por ciento. Por otra parte, quinientas veces una décima de milímetro son 50 mm de elastómero, y el cuatro y medio por ciento de esa cantidad, es 2,2 mm; esa distancia es la que se acorta el actuador o músculo.

**18.3** Donde hay poca iluminación conviene usar un material que produzca luz, y no que cambie su transparencia; por eso es preferible una pantalla de led, o de oled. Una lcd sólo verá sólo si está provista de iluminación posterior, como la tienen casi todas las pantallas de computadora basadas en esa tecnología.

**18.4** Se puede hallar esa clase de material en la espalda de los relojes pulsera, donde cumple la función de transductor de sonido para la alarma del reloj; también en encendedores de chispa de los que no usan rueda ni piedra, y que generan electricidad cuando reciben un golpe.

## Capítulo 19

**19.1** De acuerdo con la fórmula que cuantifica el efecto Casimir, que figura en el capítulo 19 y se reproduce abajo, esa fuerza vale cerca de $1{,}3\times10^{-15}$ N. Es un valor muy pequeño, que corresponde a una presión de $1{,}3\times10^{-15}$ pascales, ó $1{,}3\times10^{-20}$ atmósferas.

$$F_c = \pi hc \frac{A}{480\, d^4}$$

**19.2**

$$U = \frac{2}{3} d \sqrt{\frac{2kd}{3\varepsilon_0 A}}$$

- Si despejamos la constante k de la fórmula, resulta:

$$k = \frac{27}{8} \frac{U^2 \varepsilon_0 A}{d^3}$$

Los datos son: $U$ = 100 V; $A$ = 1000 $\mu^2$ (que resultan de multiplicar el largo de la lengüeta, por su ancho); tenemos entonces, que la constante elástica vale aproximadamente $k$ = 37,35 N/m.

Aunque el enunciado no lo pide, deducimos, a partir de la separación, o carrera, de la lengüeta, de dos micrones, que la fuerza que hace ese relé vale unos 75 millonésimas de newton; menos de ocho miligramos. (Es el producto de la constante elástica, por la carrera.) Por otra parte, el peso de la lengüeta, si fuera de bronce de densidad 8 veces la del agua; esto es, 8.000 km/$m^3$, sería de apenas 0,16 nanogramos. La fuerza que hace el relé, que parecía muy pequeña, es millones de veces mayor que el peso de su parte móvil. El peso no cuenta en la pequeña escala.

**19.3** Tenemos en cuenta que el módulo de elasticidad, conocido también como módulo de Young, *Y,* se da en pascales ($N/m^2$), o, lo que es lo mismo, en $kg/(m.s^2)$.Sus dimensiones son, entonces $M.L^{-1}.T^{-2}$. La densidad, en cambio, tiene dimensiones $M.L^{-3}$, mientras que las dimensiones de la velocidad son $L.T^{-1}$.

$$v = Y^{\alpha}\rho^{\beta}$$
$$L.T^{-1} = M^{\alpha}.L^{-\alpha}.T^{-2\alpha}.M^{\beta}.L^{-3\beta}$$

De lo que se deduce: $1 = -\alpha - 3\beta$; $-1 = -2\alpha$. Y de ahí surge que $\alpha = ½$, y que $\beta = -½$. La fórmula de la velocidad del sonido en un sólido resulta, entonces:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

La deducción a partir de argumentos físicos coincide con este resultado, no hay que agregar una constante adimensional diferente de la unidad.

**19.4** Se suele criticar a la nanotecnología, lo mismo que a la biotecnología, el empleo peligroso de técnicas de las que no se conocen con certeza sus efectos finales; y también el que se las aplique en beneficio de grandes intereses mezquinos, y aun bélicos. Pero cualquier tecnología, desde la primitiva siderurgia, que se podía emplear tanto en la fabricación de arados, como en la de cañones, tiene sus riesgos de producir daños al medio ambiente, a la salud y al bienestar humano; aparte de los usos bélicos que se le puedan dar, y de su empleo deliberado para destruir o dañar con fines egoístas. Como la nanotecnología surgió en la última década del siglo XX, no hay todavía, a comienzos del siglo XXI, leyes ni acuerdos internacionales que establezcan claros límites éticos en su desarrollo; como sí se discuten, en cambio, en relación con la manipulación genética de plantas, animales y seres humanos, algo más antigua.

Todo lo que podemos recomendar a los estudiantes, tecnólogos y científicos en formación, es que tengan presentes, como siempre, el riesgo de manipular fuerzas de alcance desconocido, y el de generar injustas diferencias de acceso a las ventajas de las técnicas, por parte de sectores ricos y pobres de la sociedad.

## Capítulo 20

**20.1** La razón por la que abundan los reclamos por las torres, quizá sea su falta de estética, o que se instalan sin el consentimiento del vecindario; y en muchos casos, porque se ignore el efecto que producen las ondas de telefonía en el organismo, en comparación con las de otros artefactos de uso diario. En cambio, pocos se quejan de los celulares, por la libertad individual que hay para usarlos, o para prescindir de ellos.

**20.2** Algunos municipios aceptan ese argumento, y prohíben que se instalen ciertas antenas en edificios que hayan declarado su valor patrimonial. De todos modos, es difícil juzgar la validez de reclamos basados en la disminución subjetiva del valor de una propiedad. En la misma línea de argumentación, alguien podría oponerse a que ingrese como inquilino una persona, en función de su nacionalidad, etnia o aspecto físico, con el argumento de que su presencia en el edificio disminuiría el valor de la propiedad frente a posibles compradores con prejuicios; y tal reclamo sería inaceptable. Todo lo que se puede recomendar, desde este libro, es estudiar y difundir las implicaciones técnicas de las instalaciones, para que las decisiones que se tomen estén bien fundadas.

**20.3** Si aceptamos, de acuerdo con las regulaciones, una densidad de potencia máxima de $1\ mW/cm^2$, y suponemos que la antena irradia uniformemente en todas direcciones[3] debemos repartir los 25 kW, equivalentes a 25.000 W, y a 25 millones de milwatt, en una superficie 25 millones de centímetros cuadrados. El área de una esfera vale $4\pi.R^2$; resulta entonces $R = (1/2) \times \sqrt{(25 \times 10^6\ cm^2/\pi)}$,

[3] Las antenas de radio se diseñan para transmitir más intensamente en la dirección horizontal; y en algunos casos, más en una dirección geográfica que en otra, según las zonas a las que se quiere llegar, que dependen de la densidad de población, y de sus características.

y eso da 1.410,474 centímetros, o 14,2 metros. La antena de esa radio tiene que estar más alta que la de una torre de telefonía celular.[4]

**20.4** La luz tiene una longitud de onda de medio micrón, o de un micrón, y pasa perfectamente por los pequeños agujeros de la reja que cubre el vidrio de la tapa, cuya abertura es de aproximadamente un milímetro, o mil longitudes de onda de la radiación visible. En cambio, las microondas miden unos 12 centímetros, y no atraviesan la reja.

[4] El estudiante, o la estudiante, que no recuerde la fórmula del área de una esfera, puede imaginar, en cambio, un cubo.. Y como 25 millones de centímetros cuadrados dividido entre las seis caras del cubo, da 4.166.667 centímetros cuadrados por cada cara, se concluye que cada una tiene 2.041,242 centímetros de lado. El centro de ese cubo imaginario está aproximadamente a 10 metros del centro de una de sus caras, y a unos 17 metros de cada vértice. Si se promedian esos valores, se obtiene una solución no demasiado diferente de la exacta para el caso de radiación uniforme en todas las direcciones.

# Glosario general

**Capítulo 1**

**ELECTRÓN**. Partícula elemental constituyente del átomo y que rodea su núcleo. Es de carga negativa. Durante breve tiempo pueden existir también electrones de carga positiva, llamados *positrones*.

**NEUTRÓN**. Partícula elemental constituyente del núcleo del átomo, de carga positiva, y de masa aproximadamente 1.836 veces mayor que la del electrón.

**COULOMB**. Unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional de unidades (SI), equivalente a la carga conjunta de 6,24150975 trillones de electrones, o de protones. Se simboliza C.

**FARADAY**. Antigua unidad de carga eléctrica, equivalente a 96.485,3415 C, o a un mol de electrones.

**MOL**. Unidad internacional de cantidad de materia, equivalente a $6{,}0221415 \times 10^{23}$ partículas. Es la cantidad de átomos de carbono 12 que hay en 12 gramos de ese elemento químico.

**UES**. Unidad electrostática de carga, llamada también *statcoulomb* y *franklin*. 2.997.924.580 ues equivalen a un coulomb.[1]

**FRANKLIN**. Véase ues.

**STATCOULOMB**. Véase ues.

**AMPERE**. Unidad internacional de corriente eléctrica, equivalente a la circulación de un coulomb por segundo.

**MAXWELL, JAMES CLERK (1831–1879)**. Físico escocés, considerado uno de los más brillantes de la historia. A partir de los trabajos experimentales y conjeturas de Michael Faraday, explicó matemáticamente la electricidad y el magnetismo, y demostró que la luz es una onda electromagnética.

**LÍNEAS DE CAMPO**. Líneas imaginarias a lo largo de las cuales actúan las fuerzas de interacción eléctrica, magnética y gravitatoria. Es una idea propuesta por Michael Faraday.

**POLARIZACIÓN**. Separación de las cargas eléctricas, según su polaridad.

**VOLT**. Unidad de potencial eléctrico en el Sistema Internacional de Unidades. Equivale a un joule de energía por cada coulomb de carga.

**CAPACITOR**. Objeto con dos conexiones o terminales, construido con el fin de almacenar en él cargas eléctricas opuestas. Se llama también *condensador*.

**DIELÉCTRICO**. Material aislante de la electricidad, por ejemplo el que separa las placas conductoras de un capacitor.

**ELECTROLÍTICO**. Relacionado con los *electrólitos* o *electrolitos*. Un electrólito es un líquido que conduce la electricidad.

**POLARIZADO, -A**. Que se polariza. En relación con los capacitores, se dice de los que se pueden conectar sólo en una de las dos polaridades, ya que si se intercambia el positivo con el negativo, ese capacitor no funciona, o se estropea.

**CAPACITANCIA**. Magnitud física dada por el cociente entre la carga de un capacitor, y la diferencia de potencial entre sus terminales. También se llama *capacidad*.

[1] Nótese que 299.192.458 metros por segundo, la velocidad de la luz en el vacío, tiene las mismas cifras significativas que las de esa constante de conversión de unidades. James Clerk Maxwell descubrió en 1864 que la electricidad y el magnetismo están muy relacionados entre sí, y con la luz.

**– PARCIAL**. La de un solo componente de un circuito

**– CONJUNTA, TOTAL, O EQUIVALENTE**. La del conjunto de todos los componentes, en la conexión que tengan.

**FARAD**. Unidad de capacitancia. Un farad es la capacitancia de un capacitor que cuando almacena cargas de un coulomb, la diferencia de potencial (o tensión) entre sus extremos, es de un volt. Su símbolo es F.

**MICRO**. Prefijo que significa un millonésimo. Se simboliza con la letra griega mu minúscula, $\mu$.

**NANO**. Prefijo que significa un milmillonésimo. Se simboliza con *n*.

**PICO**. Prefijo que significa un billonésimo.[2] Se simboliza con *p*.

**$\varepsilon_0$ (ÉPSILON SUB–CERO)**. Permitividad dieléctrica del vacío. El valor $1/(4\pi\varepsilon_0)$ es la *constante electrostática* de la ley de Coulomb. Su valor es de $8{,}8551878176... \times 10^{-12}$ F/m.

**$\varepsilon_R$ (ÉPSILON SUB–ERRE)**. Permitividad dieléctrica relativa de un material, igual al cociente entre su permitividad, y la del vacío. Carece de unidades.

**MICRÓN, O MICRA**. Millonésima parte de un metro, o milésima de milímetro.

**PISTÓN**. Objeto cilíndrico que desliza dentro de un cilindro, como el de una bomba, el de un motor de automóvil, o el de una jeringa hipodérmica.

**PARALELO (EN)**. Conexión de varios objetos de modo que entre los terminales de todos ellos hay siempre la misma tensión, que es además la del conjunto.

**SERIE (EN)**. Conexión de varios objetos de modo que por todos ellos circula la misma corriente, que es además la que circula por el conjunto.

**ELASTANCIA**. Inversa de la capacitancia. Su nombre proviene de similitudes de tratamiento matemático entre esa magnitud y la elasticidad de un resorte.

**PERMITIVIDAD**. Magnitud física que da cuenta de cuánto se polariza un material en presencia de un campo eléctrico.

## CAPÍTULO 3

**FRANKLIN, BENJAMÍN**. Político y científico estadounidense (1706–1790), inventor del pararrayos, las lentes bifocales y el catéter urinario flexible. Luchó por la independencia de su patria, y fue gobernador de Pennsylvania.

**RADIACTIVO**. Material que emite rayos alfa, beta y gamma como consecuencia de la desintegración de los núcleos de sus átomos. Los rayos alfa son núcleos de helio; los beta, electrones; y los rayos gamma son cuantos, o paquetes de energía, de ondas electromagnéticas.

**CIERNES (EN)**. Inminente, que está por ocurrir, o que se está gestando

**DESCARGADOR**. Aparato que ofrece una vía de descarga a las cargas eléctricas acumuladas, para evitar que la tensión eléctrica crezca demasiado y dañe un equipo eléctrico o una instalación.

**CALZADO CONDUCTOR**. Zapatos de suela de goma conductora (por ejemplo, por tener mucho negro de humo en su composición), que evitan que quien los calza acumule cargas electrostáticas excesivas.

**ELECTROGRAFÍA**. Arte de producir imágenes con descargas eléctricas que velan parcialmente los negativos y positivos fotográficos.

**KIRLIAN (SEMYON DAVIDOVITCH)**. Ingeniero electricista soviético (1898–1978), sobresaliente en la reparación y desarrollo de aparatos de laboratorio, e inventor de las electrografía de alta frecuencia. Alcanzó fama cuando interpretó las imágenes como una supuesta aura, o alma de los seres vivos.

**EFECTO KIRLIAN**. Electrografía realizada con tensiones de miles de voltios, y centenares de hertz de frecuencia. Los objetos conductores, como un dedo, o una hoja verde, aparecen rodeados de un fulgor.

**GIGAWATT, O GIGAVATIO**. Mil millones de watt, o vatios.

**KILOTÓN**. Energía equivalente a la que se libera en el estallido de mil toneladas de TNT. Esa unidad, y el megatón, se usan para hablar del poder destructivo de las armas nucleares.

**TRINITROTOULENO, O TNT**. Sustancia química de fórmula $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$, inventada en 1863 como colorante amarillo, hasta que años después se descubrieron sus propiedades explosivas útiles en minería.

[2] En los Estados Unidos de América ese prefijo tiene nuestro mismo significado, pero allá dicen que *one pico* es *one trillionth*; y que *one nano* es *one billionth*.

**DESPRESURIZAR**. Disminuir la presión de un gas, por ejemplo cuando se abre un tanque de aire comprimido, o cuando se reduce la presión de la cabina de pasajeros de un avión.

## CAPÍTULO 6

**CONDUCTOR**. Material que conduce mucho la electricidad.
**AISLANTE**. Material que conduce muy poco la electricidad, o no la conduce.
**SEMICONDUCTOR**. En el ambiente eléctrico, material de propiedades intermedias entre las de los conductores y las de los aislantes. En el ámbito electrónico, ciertos materiales que conducen la electricidad cuando reciben señales eléctricas, ópticas o de otro tipo.
**TRAFILAR**. Hacer que un material pase a través de un agujero, para convertirlo en alambre.
**ANODIZAR**. (de *ánodo*). Sumergir un cuerpo en un líquido, conectarlo al polo positivo y hacerle pasar corriente, para cubrir su superficie con una capa protectora de otro material.
**RESISTIVIDAD**. Magnitud física que caracteriza la dificultad de los materiales para conducir la corriente eléctrica. Se indica con la letra griega minúscula ro, $\rho$. Se calcula como el producto de la resistencia del cuerpo, por el área transversal, dividida por la longitud, y se mide en $\Omega$.m. Su inversa es la conductividad, y se expresa en S/m.
**CONDUCTANCIA**. Magnitud física inversa de la resistencia. Se indica con la letra G, y se mide en siemens.
**LEVITACIÓN MAGNÉTICA**. Efecto por el cual un cuerpo se mantiene suspendido sobre otro, a causa de fuerzas magnéticas.[3]
**PICOCOULOMB**. Billonésima parte de un coulomb; esto es, 0,000 000 000 001 C.
**POLIMERIZAR**. Unir las moléculas relativamente chicas de un material (llamado *monómero*), para formar moléculas mucho mayores, las del polímero.
**RESINAS EPÓXICAS**. Familia de polímeros sintéticos provenientes de la reacción entre la epicloridina y el bisfenol. Los enganches entre las moléculas de monómero los proveen átomos de oxígeno. La palabra epoxi significa, justamente, puente de oxígeno.

## CAPÍTULO 7

**MAGNETOSOMA**. Cada una de las partículas de magnetita que sintetizan ciertas bacterias anaeróbicas, y que les sirven para orientarse en el campo magnético terrestre.
**FERROMAGNÉTICO**. Se dice del material que, como el hierro, es capaz de retener el magnetismo.
**PARAMAGNÉTICO**. Material que no retiene el magnetismo.
**DIAMAGNÉTICO**. Material que rechaza un imán, en vez de atraerlo como al hierro.
**TEMPERATURA DE CURIE**. Temperatura por encima de la cual las propiedades ferromagnéticas de un material desaparecen, y se torna paramagnético.
**LÍNEA DE CAMPO LOCAL**. La que pasa por el punto que se está considerando, y que indica, en ese sitio, la dirección del campo.
**ELASTÓMERO**. Polímero elástico. Las moléculas muy grandes de un polímero resultan de la unión de moléculas menores, las del *monómero*.
**DEMAGNETIZACIÓN, O DESMAGNETIZACIÓN, ADIABÁTICA**. Procedimiento por el cual se alcanzaron temperaturas tan bajas como un milésimo de kelvin. Consiste en magnetizar un cuerpo, esperar que se enfríe, y quitarle el magnetismo, para que su temperatura disminuya aun más. Adiabático significa que no intercambia calor.
**UNIVERSIDAD DE MASSACHUSETTS**. Centro público de estudio e investigación, fundado en 1883 en el estado del mismo nombre de la Unión, y compuesto por cinco casas asociadas.
**ESPÍN**. Magnitud física de carácter cuántico, asociada a las partículas elementales, como el electrón, y que se interpreta como un movimiento de giro.
**DIPOLO**. Conjunto de dos polos. En el magnetismo, elemento mínimo de magnetización, puesto que no existen polos magnéticos únicos o aislados.
**WEISS, PIERRE**. Investigador francés creador de la teoría de los dominios magnéticos.
**DOMINIO MAGNÉTICO**. Región de un material en la que los dipolos elementales comparten la di-

[3] Aunque el Diccionario dice que levitar es elevarse en el espacio sin que intervengan agentes físicos, ese término tomado de la fantasía tiene hoy un significado más amplio, que incluye fenómenos verdaderos.

rección de magnetización, diferente de la de los dominios vecinos.

**HALL, EDWIN DUNTEY**. Investigador estadounidense descubridor del efecto por el cual, cuando se somete a un campo magnético un conductor por el que circula corriente, aparece una tensión entre sus bordes laterales.

**EFECTO HALL CUÁNTICO**. Útil variedad del efecto Hall, mucho más intenso que el descubierta por E. H. Hall, y llamado así porque lo explica la física cuántica.

## CAPÍTULO 8

**INDUCCIÓN MAGNÉTICA**. 1). Efecto por el que los imanes, o una corriente, induce magnetismo en un material. 2). Nombre de la magnitud física *densidad de flujo magnético*, expresada en tesla, o weber por metro cuadrado.

**OERSTED, HANS CHRISTIAN (1777–1851)**. Físico y químico danés, hijo de farmaceuta, estudioso de la electricidad y el magnetismo. Fue el primero en publicar experimentos que muestran la influencia entre ambos fenómenos.

**PRINCIPIO GENERADOR**. Efecto por el cual en un conductor se induce una fuerza electromotriz, cuando cruza líneas de campo magnético.

**PRINCIPIO MOTOR**. Efecto por el cual sobre un conductor aparece una fuerza, cuando por él circula corriente, y además está sometido a un campo magnético.

**TESLA**. Unidad de inducción magnética, o de densidad de flujo, en el sistema internacional de unidades (SI) y en el Sistema Métrico Legal Argentino (SIMELA). Un tesla es la inducción que produce, a un metro de distancia, un conductor recto y de longitud muy grande (idealmente infinita), por el que circule medio ampere.

**LEY DE LORENTZ**. Expresión matemática de la fuerza que ejerce el campo magnético sobre una corriente eléctrica, o sobre una carga en movimiento. Esa fuerza es perpendicular al campo y a la corriente; o bien, al campo y a la velocidad de la carga.

**TRAFO**. Nombre familiar y abreviado del transformador, en la jerga de los especialistas en electricidad.

**AUTOINDUCCIÓN**. Inducción de una fuerza electromotriz en el propio conductor por el que pasa una corriente variable.

**LENZ, HEINRICH FRIEDRICH EMIL (1804–1865)**. Científico nacido en lo que hoy es Estonia, entonces Alemania del Báltico. Investigó en oceanografía, enseñó física y matemática, y propuso un enunciado sugestivo a la ley que establece la polaridad de una fuerza electromotriz inducida: *Los efectos se oponen a sus causas*.

**LEY DE BIOT Y SAVART**. Expresión matemática de la contribución a la densidad de flujo (o inducción magnética) en un punto del espacio, de cada segmento de un conductor por el que circula corriente.

**PERMEABILIDAD MAGNÉTICA DEL VACÍO**. Propiedad del espacio, que en conjunto con la permitividad dieléctrica del vacío, caracteriza la electrodinámica, y la vincula con la óptica. El concepto fue definido por Faraday, y precisado por Maxwell. Su magnitud es de $4\pi \times 10^{-7}$ unidades tesla por metro.

**MU SUB CERO**. Sonido castellano del símbolo $\mu 0$, correspondiente a la permeabilidad magnética del vacío.

**SOLENOIDE**. 1). *adj*. Con forma de tubo. 2). *m*. Bobina de forma tubular, como una serpentina.

**TOROIDE**. 1). *adj*. con forma de toro. 2). *m*. Bobina (o núcleo de bobina) con forma de toro, nombre de la forma geométrica engendrada en el espacio por una circunferencia cuyo centro se desplaza por otra circunferencia perpendicular. El nombre proviene de un antiguo juego mexicano, parecido al nuestro del sapo, en el que se arrojaban unas rosquillas de trapo a las astas de una cabeza de toro embalsamada, con el fin de ensartarlas.

**RELUCTANCIA**. Magnitud física, expresada en inversas de henry, que da cuenta de la oposición que ofrece un circuito magnético al flujo. Su valor es igual al cociente entre la longitud del circuito, y el producto entre la sección y la permeabilidad.

**RELÉ**. (Del inglés *relay*). Relevo de contactos. Dispositivo electromecánico con una bobina que, cuando pasa corriente por ella, magnetiza un núcleo, el núcleo atrae una pieza móvil fija a contactos móviles, que se cierran o se abren.

## CAPÍTULO 9

**TERRELA**. Nombre que dio William Gilbert, en su

libro De Magneta, a los modelos de Tierra magnética que hizo con imanes y arcilla. También usó el nombre *telera*.

**ALLAN M. CORMACK Y GODFREY N. HOUNSFIELD**. Físico el primero, e ingeniero electrónico el segundo, ganadores del Premio Nobel de Medicina en 1979, por el desarrollo del tomógrafo axial computarizado.

**TOMÓGRAFO AXIAL COMPUTARIZADO**. Aparato, usado principalmente en diagnóstico médico, que obtiene imágenes de las secciones transversales de un cuerpo.

**MAGNETISMO**. Fenómeno físico por el cual se producen fuerzas entre los imanes, o bien entre estos y las corrientes eléctricas, y también entre las corrientes solas, y cargas en movimiento.

**TOMOGRAFÍA**. Obtención de imágenes semejantes a las que resultan de cortar un cuerpo.

**JOHANN RADON (1887-1956)**. Matemático austríaco que resolvió el problema de cómo reconstruir una imagen de dos dimensiones, a partir de un conjunto de suficientes ecuaciones de la absorción de cada elemento de superficie, a lo largo de rectas que pertenecen a esa superficie.

**RMN (RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR)**. Técnica utilizada principalmente en el diagnóstico médico, basada en la aplicación de campos magnéticos y radiaciones que no son ionizantes.

**CAMPO MAGNÉTICO**. Lugar del espacio en el que se manifiestan fuerzas magnéticas de imanes, corrientes, o cargas en movimiento; y, más modernamente, efectos de los imanes, corrientes y cargas móviles.

**ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS IONIZANTES**. Aquéllas que ionizan la materia sobre la que inciden, es decir, que desarman sus moléculas, o arrancan electrones de los átomos; por ejemplo la luz ultravioleta, los rayos X, alfa, beta y gamma.

**PALEOMAGNETISMO**. Parte de la geología que estudia la intensidad, dirección y sentido del campo magnético terrestre, en épocas pasadas.

**SQUID (SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFERENCE DEVICE)**. Dispositivo superconductor de interferencia cuántica. Aparato muy sensible para medir campos magnéticos débiles, basado en el efecto del campo en la circulación de una corriente por un superconductor.

**POLARIDAD NORMAL**. Así se nombra la polaridad actual del campo magnético terrestre, por corresponder a la época contemporánea.

**ERA, EÓN, PERÍODO, ÉPOCA, CRON, SUBCRÓN**. Términos geológicos que designan períodos de tiempo. La edad de la Tierra se clasifica en cinco eras geológicas; cada una e ellas, en períodos; y éstos en épocas. Un eón es mil millones de años; un cron, un millón de años, y un subcrón, un período más breve de interés particular.

**SUPERCONDUCTOR**. Material que en determinadas condiciones de temperatura, densidad de corriente y campo magnético al que se lo somete, carece por completo de resistencia eléctrica.

**INDUCCIÓN MAGNÉTICA MÁXIMA DE UN SUPERCONDUCTOR**. Valor máximo de la inducción a la que se puede someter un superconductor, para que lo siga siendo.

**EFECTO MESSNIER**. Efecto por el cual cuando un material se vuelve superconductor, expulsa por completo el campo magnético de su interior, y si ya era superconductor, no permite que le entre el campo.

**FERROMAGNÉTICO**. Se dice del material que, como el hierro, es capaz de retener el magnetismo. *(Ya está en el glosario del capítulo 7.)*

**PARAMAGNÉTICO**. Material que no retiene el magnetismo. *(Ya está en el glosario del capítulo 7.)*

**DIAMAGNÉTICO**. Material que rechaza un imán, en vez de atraerlo como al hierro. *(Ya está en el glosario del capítulo 7.)*

**HISTÉRESIS MAGNÉTICA**. Efecto por el cual la inducción magnética de un material depende no sólo de la intensidad del campo magnético al que se lo somete, sino también de los valores anteriores a los que estuvo sometido.

**MAGNETOESTRICTIVOS**. Material que se encoge cuando se le aplica un campo magnético.

**MAGNETORRESISTIVOS**. Material cuya resistencia eléctrica varía, según el campo magnético al que se lo somete.

**MAGNETOÓPTICO**. Material cuyas propiedades ópticas varían con el magnetismo al que se lo somete.

**MAGNETOCALÓRICO**. Material que se enfría cuando se le quita el campo magnético al que estaba sometido.

**MEMORIA DE TOROS**. Antiguo dispositivo de alma-

cenamiento de datos, basado en anillos ferromagnéticos enhebrados en conductores eléctricos. Los pulsos magnetizan y desmagnetizan esos anillos.
PULSO DE CORRIENTE. Corriente de muy breve duración; en computación, de milmillonésimas de segundo.

### Capítulo 10

RESINA EPOXICICLOALIFÁTICA. Polímero desarrollado en 1930, apropiado para la fabricación de aisladores que brindan servicio a la intemperie. Cicloalifática, o alicíclica, es una de las clases de moléculas orgánicas en forma de anillo cerrado; otra es la aromática.
ECOLOGÍA. 1). Ciencia que estudia los seres vivientes en relación entre sí, y con el medio ambiente.2). Cuidado de la vida y del medio ambiente.
PCB. Policlorobifenilo; familia de sustancias de buenas propiedades aislantes de la electricidad, y que se usaban en los transformadores antes de que preocupase su toxicidad. Sus moléculas son las 209 combinaciones de átomos que se pueden hacer de modo que resulten unidos dos anillos bencénicos, en los cuales al menos uno de los átomos de hidrógeno se reemplaza por uno de cloro.
IONIZAR. Producir iones. *(Repite el glosario del capítulo 2).*
MICROTESLA. Millonésima parte de la unidad tesla de inducción magnética. *(Véase tesla en el glosario del capítulo 8).*
REACTOR, REACTANCIA O BALASTO. Bobina con núcleo de hierro que se pone en serie con ciertos tubos fluorescentes y lámparas de mercurio, para limitar la corriente.
DEUTERIO. Variedad, o isótopo, del hidrógeno, cuyos átomos tienen, cada uno, un protón, un neutrón y un electrón.
HELIO. Elemento químico descubierto en el Sol antes que en la Tierra (de ahí su nombre, que significa Sol en griego), cuyos átomos están compuestos por dos protones, dos neutrones y dos electrones. (En suma, un helio se compone de dos deuterios.)
CÁMARA TOROIDAL. Recinto cerrado en forma de toro. El toro es la forma geométrica de una rosquilla, o una cámara de neumático de coche. El nombre deriva de un antiguo juego mexicano, semejante al nuestro del sapo, en el que se arrojaban rosquillas de trapo a una cabeza de toro embalsamada, para ensartarlas en las astas.
PARAMAGNÉTICO. Material que no retiene el magnetismo. *(Ya está en los glosarios de los capítulos 7 y 9).*

### Capítulo 11

VÁLVULA TERMOELECTRÓNICA. Ampolla de vidrio cerrada al vacío, con un filamento en su interior que se pone incandescente con el paso de una corriente eléctrica; además una placa, y a veces varios electrodos en forma de rejilla. Su nombre proviene de que deja pasar la corriente en un solo sentido.
VÁLVULA TERMOIÓNICA. 1). Válvula con gas en su interior, cuyos iones intervienen en la conducción. 2). Nombre que se dio a la válvula termoelectrónica cuando se creía que la corriente entre el cátodo y el ánodo se debía al movimiento de iones de carbono.
DIODO. Dispositivo eléctrico que posee dos contactos o electrodos, y que hasta determinados valores de la tensión, deja pasar la corriente en sólo un sentido.
RADIOTELEGRAFÍA. Telegrafía inalámbrica. Transmisión de señales telegráficas, por ejemplo mediante el código Morse, por medio de ondas electromagnéticas.
RADIOTELEFONÍA. Telefonía inalámbrica, hoy llamada radio, por brevedad. Transmisión de los sonidos por medio de ondas electromagnéticas.
TRIODO AMPLIFICADOR. Triodo. Válvula termoelectrónica de tres electrodos principales: cátodo, ánodo y grilla. Cuando recibe una señal eléctrica pequeña en la grilla, deja pasar una corriente de variaciones amplias, que amplifican la señal.

### Capítulo 12

ELECTROTECNIA. Estudio de las aplicaciones técnicas de la electricidad.
CURVA CARACTERÍSTICA. Representación gráfica de la corriente en función de la tensión, o de algún otro conjunto de magnitudes eléctricas, de un componente de un circuito. Por ejemplo,

y en un triodo de vacío, la corriente de placa en función de la tensión entre ese electrodo y el cátodo, para una determinada tensión de grilla.

ÓHMETRO. Instrumento para medir la resistencia eléctrica. A veces forma parte de un medidor de usos múltiples, el *multímetro*, que incluye funciones de voltímetro, amperímetro y termómetro, entre otras.

DOPADO. O dopaje. En el ámbito de la electrónica, agregado de pequeñas cantidades de otro elemento químico, a aquél con el que se fabrica un cristal semiconductor. Según con qué se realice el dopado, se obtienen cristales P o N.

RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA. El compuesto por un único diodo, que deja pasar corriente en un sentido, y le impide la circulación en el opuesto.

RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA. El compuesto por dos diodos, o cuatro, y que convierte en positivos los semiciclos negativos de la tensión alterna de entrada.

COMPONENTE PASIVO. El que no aporta energía a un circuito; por ejemplo un resistor, un capacitor, un inductor o un diodo.

COMPONENTE ACTIVO. El que aporta energía a un circuito, por ejemplo una pila, una batería, o un amplificador que incluya su fuente de alimentación.

FUENTE REGULADA. Aparato alimentado con corriente alterna que toma de la red, y que provee una tensión continua de valor muy estable frente a las variaciones de la tensión alterna de entrada, y las del consumo, o carga, que se le conecta a la salida.

## Capítulo 13

TRANSCONDUCTANCIA. Cociente entre la variación de la tensión de salida, y la variación de la corriente de entrada en un triodo de vacío, o en un transistor. Al igual que la conductancia, se expresa en siemens, o inversa de ohm. La diferencia entre la transconductancia y la conductancia, es que en ésta la tensión y la corriente corresponden al mismo cuerpo o elemento del circuito.

TRANSISTOR. Triodo de estado cristalino. Dispositivo de tres electrodos, que conduce mucho la corriente eléctrica entre dos de ellos, cuando por el tercero pasa una débil corriente.

VARICAP. Capacitor cuya capacitancia aumenta abruptamente a partir de cierto valor de la tensión. Se usa para proteger circuitos de tensiones excesivas momentáneas que puedan recibir.

TRANSISTOR DE JUNTURA. El que tiene los cristales P y N depositados uno sobre otro, en un área de unión amplia y firme.

TRANSISTOR DE PUNTA DE CONTACTO. Aquél en el que el contacto entre electrodos se consigue con el apoyo de uno en punta sobre otro plano, como lo representa el símbolo del transistor.

POTENCIÓMETRO. Resistor variable a voluntad, con una perilla giratoria. o un cursor deslizante. Recibe ese nombre porque primitivamente se lo usaba casi exclusivamente para medir diferencias de potencial eléctrico.

ZUMBADOR. Aparato que zumba o silba cuando se lo alimenta eléctricamente. Sirve para hacer timbres y alarmas.

OSCILADOR. Circuito que produce una corriente eléctrica alterna cuando se lo alimenta con continua. Si se conecta su salida a un auricular, bocina, o parlante, éstos suenan.

FÍSICA CUÁNTICA. La desarrollada a partir de 1916, según la cual todas las partículas tienen propiedades ondulatorias. Su nombre proviene del *cuanto*, nombre de la energía mínima que puede transferir una partícula a otra, y que depende de la frecuencia. esta parte de la física tiene especial importancia en el estudio del movimiento de los electrones y la conducción eléctrica.

FOTORRESISTOR. Resistor cuya resistencia eléctrica depende de la luz que recibe, y que se usaba en aparatos de encendido automático de luces al caer la noche.

## Capítulo 14

SOLENOIDE. *Véase el glosario del capítulo 8.*

INDUCTANCIA. Magnitud física dada por el cociente entre la fuerza electromotriz inducida, y la variación temporal de la corriente eléctrica. Se mide en henry, o volt segundo por ampere.

FOTOVOLTAICO. Efecto por el cual algunos cuerpos generan tensión eléctrica cuando les da la luz.

**PICOFARADIO**. Billonésima parte de un faradio. En inglés americano, billón se dice *trillionth*, y eso a veces se traduce mal a nuestra lengua. 1 pF = $10^{-12}$ F.
**OPTOACOPLADOR**. Componente compuesto por un led y un fototransistor, fotodiodo o fotorresistor. Cuando recibe una señal eléctrica, el led enciende, e ilumina la otra parte, que entonces conduce la corriente. Sirve para separar eléctricamente dos partes de un circuito.
**TIRISTOR**. Diodo controlado, que comienza a conducir cuando recibe una señal eléctrica en su compuerta, o electrodo de control, y sigue conduciendo hasta que la corriente disminuye bastante. Cuando es de silicio, se lo llama también SCR, *silicon controlled diode*.
**TRIAC**. Diodo controlado que conduce en ambos sentidos cuando recibe una señal en su compuerta; y lo sigue haciendo hasta que la corriente desciende por debajo de cierto valor.
**RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA**. Ondas que se propagan en el vacío y en medios transparentes, como la luz, los rayos X, los gamma, los infrarrojos, los ultravioleta la luz visible, las ondas de radio y TV y las microondas.
**PIEZOELÉCTRICO**. Del griego *piezo*, presión. Se dice del material que genera electricidad cuando se lo deforma, y que se deforma cuando se le aplica electricidad.

## Capítulo 15

**SEGUIDOR EMISÓRICO**. Circuito realizado con un único transistor, cuya tensión de salida es prácticamente igual a la de entrada, pero con una mayor corriente disponible.
**OP-AMP**. Forma abreviada de referirse a un amplificador operacional.
**REALIMENTACIÓN POSITIVA**. Retorno de la salida de un circuito hacia la entrada, de modo que ésta se refuerza.
**REALIMENTACIÓN NEGATIVA**. Retorno de la salida de un circuito hacia la entrada, de modo que ésta se debilita.
**INTEGRAL**. Límite matemático de la suma de los productos de los valores de una función, por cada intervalo de variación de su variable, cuando estos intervalos tienden a cero y, por consiguiente, la cantidad de sumandos tiende a infinito. Se representa gráficamente como el área encerrada entre la gráfica de la función, y el eje de abscisas.
**FILTRO**. Elemento de un circuito que permite el paso de señales de ciertas frecuencias, e impide o atenúa el paso de señales de otras frecuencias.
**FILTRO PASIVO**. El que no utiliza una fuente externa de energía, por ejemplo un capacitor en paralelo como filtro pasabajos.
**FILTRO ACTIVO**. El que emplea fuente externa de energía. por ejemplo un amplificador, o conjunto de ellos, conectados a capacitores, inductores u otros elementos.
**SINUSOIDAL**. En forma de sinusoide, curva que resulta de representar gráficamente el seno trigonométrico de una variable.

# Apéndice I. Física cuántica




En el átomo más sencillo que existe, su único electrón gira sólo en ciertos radios, cuyas relaciones son las mismas que las que hay entre los cuadrados de los números naturales: 1, 4, 9, 16, etcétera. Así como cuando cantamos en el baño, resuenan sólo determinadas frecuencias, el electrón, que es una onda, sólo se mantiene donde resuena.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Toda partícula tiene una longitud de onda, que depende de su masa y de la velocidad a la que se desplaza. $\lambda$: longitud de onda; $m$: masa, $v$: velocidad; $h$: constante de Planck, que vale $6{,}62606896 \times 10^{-34}$ J.s. Un pelotazo tiene una longitud de onda asociada de sólo $4 \times 10^{-35}$ m; por eso en una pelota la dispersión ondulatoria es insignificante en comparación con su diámetro. En cambio, para un electrón, esa longitud de onda es de unos tres angstrom, aproximadamente el tamaño del átomo entero; el electrón está en toda la órbita a la vez.

## Historia

**Relatividad mecánica.** La ciencia física existe desde tiempo muy antiguo. Arquímedes de Siracusa (287 aC –212 aC), por ejemplo, además de expresar de manera muy rigurosa la ley de flotación,[1] y la de la palanca,[2] e interesado en la estabilidad de las naves, supo bastante física y matemática como para calcular el volumen de un paraboloide de revolución cortado por un plano oblicuo, hallar su centro de gravedad, y su centro de empuje de flotación. A pesar de ese singular antecedente, muchos estudiosos coinciden en señalar como el verdadero iniciador de la física, en el sentido actual que tiene esa palabra, a Galileo Galilei (1564 –1642). De él es el principio de relatividad mecánica, de 1638, una idea revolucionaria en su época que establece que no hay ningún experimento mecánico capaz de detectar si el laboratorio donde se lo lleva a cabo está quieto, o si se desplaza en línea recta, y con velocidad constante.

**Relatividad electromagnética.** Otra revolución del pensamiento físico fue la de Albert Einstein (1879 –1955), quien, en 1905, agregó a lo dicho por Galileo que no hay ningún *experimento*, a secas (sea mecánico, óptico, magnético, eléctrico u otro), capaz de detectar dicho movimiento relativo uniforme y rectilíneo.[3] En 1915 Einstein estableció un principio físico aún más radical: todos los marcos de referencia son equivalentes, y en ellos se cumplen las mismas leyes físicas.[4]

**Cuántica.** Posiblemente una tercera revolución, aún mayor, del pensamiento físico, fue la *física cuántica, mecánica cuántica* o *mecánica ondulatoria*, de 1916, resultado de las investigaciones y estudios de muchos físicos, entre ellos Louis de Broglie, Max Planck, Ernst Shrödinger (o Scroedinger, en grafía inglesa), y Werner Hisenberg. Esa rama de la física, que hoy tiene muchas aplicaciones prácticas, resultó de los intentos de explicar hechos que habían resultado oscu-ros durante muchos años. Uno es el modelo de Rutherford y Bohr del átomo. Ese modelo consiste en un núcleo positivo, a cuyo alrededor giran electrones de carga negativa. Había dos preguntas que intrigaban a los investigadores:

1 *Todo cuerpo sumergido recibe una fuerza hacia arriba igual al peso del líquido que desaloja.*

2 *En una palanca, las fuerzas están en proporción inversa a la de sus brazos.*

3 De tal hecho, conocido como *relatividad especial*, restringida a movimientos rectos y de velocidad constante, se deduce que el tiempo no es absoluto, sino que depende de la velocidad de un observador con respecto a otro. Lo mismo pasa con las longitudes, el campo eléctrico, el magnético, y con multitud de otras magnitudes físicas.

4 Ése es el principio de *relatividad general*, que incluye la gravedad y la aceleración, las cuales, según esa ley o principio, son equivalentes. Por ello, no existe experimento capaz de decidir si un laboratorio se encuentra acelerado o si, en cambio, está sometido a fuerzas gravitatorias. De este principio surgió la idea de un espacio tiempo curvo.

• ¿por qué los electrones giran sólo en órbitas de determinados diámetros posibles, y no a cualquier distancia del núcleo?
• ¿y por qué los electrones, que están acelerados, no irradian energía, a expensas de su energía cinética (o de movimiento) hasta caer sobre el núcleo?[5]

La respuesta fue insólita, increíble en su momento; y aún hoy causa asombro: los electrones no son partículas cuya presencia esté concentrada en una región muy pequeña, como se creía. Un electrón no está en un lugar determinado; *está repartido en toda su órbita*, como una ola de agua del mismo tamaño que el recipiente en el que está contenida.

Además de los electrones, toda partícula tiene asociada una onda, cuya longitud, $\lambda$ (lambda) se llama *longitud de onda de Louis de Broglie*.

Además de que todas las partículas son ondas, o tienen propiedades de onda, hay otro hecho de la física cuántica, que es el central de esa teoría.[6] Los intercambios de energía entre partículas ocurren siempre en forma de paquetes de energía, llamados *cuantos*. Una partícula puede transferirle a otra un cuanto, dos cuantos, tres, o más, o bien ningún cuanto de energía; pero no le puede transferir medio cuanto, ni 6,8 cuantos. La energía, igual que la materia, es discontinua. La energía de un cuanto vale $E = h.\nu$, donde $h$ es la constante de Planck, y $\nu$ (ni, o nu) es la frecuencia de la onda. Otra fórmula equivalente es $E = h.c/\lambda$, donde $c$ es la velocidad de la luz, y $\lambda$ (lambda), la longitud de un ciclo de la onda.

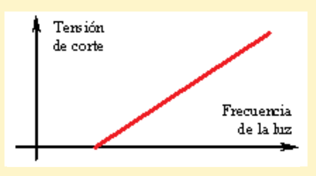
Una consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la materia, y del hecho de que la energía sólo se transfiera en cuantos, es la imposibilidad de determinar a la vez la posición y la velocidad de una partícula.[7] Otra, es la desaparición del concepto de causa y efecto, tal como se lo entendía antes del advenimiento de la mecánica cuántica. Omitimos, en este espacio, la explicación de esos hechos; pero los señalamos como una verdadera revolución del pensamiento físico y filosófico.

En algunos ambientes mágicos y místicos, se habla de *medicina cuántica*, *psicología cuántica*, y variantes. El significado de la palabra cuántica, en ese contexto, es muy lejano al que utiliza la ciencia física. La figura ilustra supuestas propiedades curativas de las piedras preciosas.

## LA CÉLULA FOTOELÉCTRICA: UNA PUERTA DE ENTRADA A LA CUÁNTICA

La célula fotoeléctrica, fototubo, o fotocélula, muy relacionada con la teoría cuántica, es un dispositivo industrial que se usó mucho –y aún hoy se lo emplea, aunque se usan más los fototransistores– para abrir puertas, contar objetos, medir el nivel de líquidos, etcétera.[8]

Una fotocélula es un diodo de vacío de cátodo frío. Pero, al contrario de las válvulas rectificadoras de corriente, su cátodo, o electrodo negativo, es amplio; y su ánodo, delgado. Heinrich Hertz descubrió en 1887, que cuando incide luz sobre el cátodo, se despren-




**Curva característica de un fototubo. Cuanto mayor sea la frecuencia de la luz incidente, mayor es la tensión inversa necesaria para impedir el flujo de electrones.**



Antigua célula fotoeléctrica Toshiba PG 51. El sector cilíndrico es el cátodo, y la varilla central, el ánodo. Cuando se aplican algunos centenares de voltios entre los electrodos, circulan unos 150 microamperes, por cada lumen de flujo luminoso.



La energía de un fotón es igual al producto de su frecuencia, por la constante de Planck.

[5] Un movimiento circular es siempre acelerado, porque cambia la dirección del vector velocidad. Y las cargas aceleradas emiten radiación. (Véase el capítulo 11.)

[6] Cuando se dice teoría cuántica, teoría atómica, o teoría de la selección natural, la palabra teoría tiene, en este ámbito técnico y científico, el significado de un cuerpo organizado de conocimientos, generalmente muy corroborados. En otros contextos, teoría significa sólo una hipótesis sin corroborar; por ejemplo, la teoría conspirativa.

[7] Puesto que una partícula es una onda, está naturalmente dispersa en el espacio, del mismo modo en el que lo está una ola en el mar, en la dirección en la que avanza; o una onda que se desplaza –o permanece estacionaria– en una soga tensa. Un ejemplo de una onda muy localizada en el espacio, es la propagación de un pulso muy poco extenso. Ese pulso se compone de la superposición de muchas ondas de frecuencias muy diferentes; así, pues, el pulso está concentrado en posición, pero disperso en frecuencia. Y como la frecuencia es proporcional a la energía, y ésta depende de la velocidad, resulta que cuando la posición de una partícula está bien definida, su velocidad resulta indefinida; y viceversa. Ese hecho se conoce como *principio de incertidumbre* de Heisenberg.

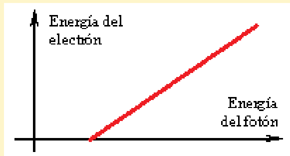
[8] Véase el esquema del capítulo 11. Hay también referencias en el 13 y el 19.

den electrones, que recoge el ánodo, y así se detecta la luz incidente. Y aun cuando no se aplica tensión, la luz arranca electrones de la placa, que dan lugar a una corriente eléctrica entre ella y el alambre. Para que cese ese flujo de electrones, se debe invertir la tensión; hay que polarizar positivamente la placa amplia, y negativamente la varilla central. En ese caso los electrones regresan, y no circulan.

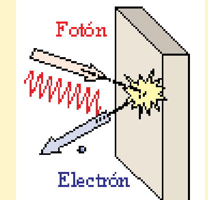
La tensión necesaria para que la fotocélula no conduzca (la tensión de corte) depende linealmente de la frecuencia de la luz, y también del tipo de material donde incide, pero no depende del material del otro electrodo, o sea el del colector de electrones. La luz de mayor frecuencia (azul, violeta, ultravioleta) arranca más fácilmente electrones, que la de menor frecuencia (anaranjada, roja, infrarroja).

Durante más de diez años nadie supo dar razones de esa dependencia l, hasta que Albert Einstein, con la ayuda de ideas cuánticas, de las que descreía entonces, ofreció una explicación muy sencilla.

Einstein multiplicó la frecuencia por la constante de Planck, e interpretó ese producto como la energía de un fotón, o cuanto de radiación electromagnética, $E_F = h.\nu$. A la vez, multiplicó la tensión de corte por e, la carga del electrón, e interpretó el producto, $E_E = U_C.e$, como la energía del electrón, que adquiere cuando el fotón incidente lo arranca de la placa de la celda fotoeléctrica.[9]




Con esa nueva forma de ver la misma gráfica, Einstein imaginó que sobre la placa incide un fotón de determinada energía, que depende solamente de la frecuencia de su luz. Parte de esa energía se emplea en arrancar un electrón del metal, donde es cautivo de fuerzas electrostáticas. La energía restante queda en el electrón, en forma de energía cinética, o de movimiento. La tensión de corte frena el electrón (le quita su energía cinética), y lo regresa al metal.




Esa interpretación le valió el Premio Nobel de Física en 1921, aunque en la decisión del jurado, intervinieron, sin duda, los trabajos de Einstein sobre relatividad.

Nótese el pensamiento cuántico del físico: Convirtió la observación de variables que parecen continuas, como la tensión y la frecuencia, en magnitudes claramente discontinuas, como lo son un electrón individual, y el fotón que lo arranca de la placa metálica.

## Radiación del cuerpo negro, otra puerta de entrada a la cuántica

Otro estudio que contribuyó grandemente al desarrollo de la mecánica cuántica, fue el de la *radiación del cuerpo negro*. Un cuerpo negro es un objeto que absorbe toda radiación que le llega, y es también el que más radiación emite, para una dada temperatura y área de emisión.[10] Desde el siglo XIX se conocía en detalle la distribución de energía de la radiación de un cuerpo negro; es decir, qué fracción porcentual de potencia emite ese cuerpo, por unidad de área, en cada banda de frecuencias, y para cada temperatura; pero no se hallaba una explicación satisfactoria del porqué de esa distribución en particular.

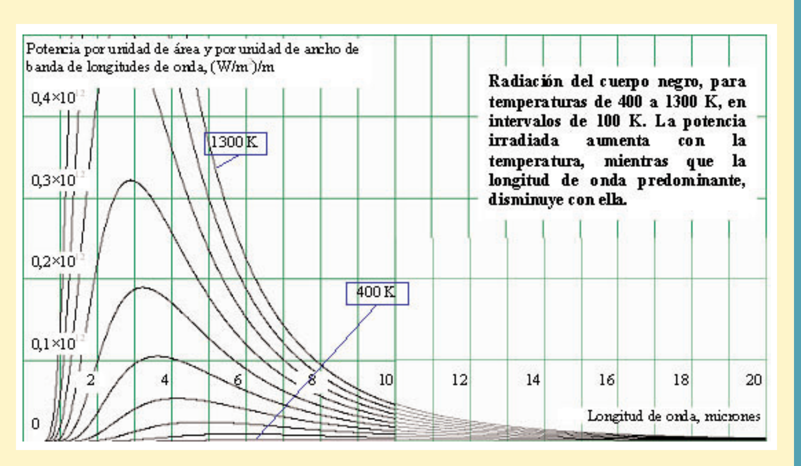
Un cuerpo negro (y cualquier otro) está formado por un gran número de osciladores, uno por cada átomo, o uno por cada electrón, y la radiación proviene de las oscilaciones de las cargas eléctricas. En los primeros intentos de explicación, se suponía la energía distribuida de manera continua entre los osciladores; pero eso llevaba a curvas de distribución diferentes de las observadas experimentalmente. Max Planck introdujo en 1900 una hipótesis extraña y descabellada, al principio sólo para que las fórmulas coincidiesen con la realidad: "*La energía no se*

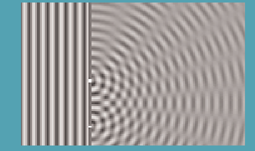
[9] Recordemos que la tensión, o diferencia de potencial, es el cociente entre la energía necesaria para llevar una partícula cargada de un punto a otro, y el valor de su carga.

[10] Ejemplos familiares –y aproximados– de radiación de cuerpo negro, son un horno con la puerta abierta, un hierro al rojo, y hasta el propio cuerpo humano.

*distribuye de manera continua, sino en paquetes"*. Calculó el tamaño de cada paquete de energía para que todo coincidiese, y lo halló proporcional a la frecuencia. Entonces sí las fórmulas reflejaron fielmente la realidad.

Enseguida se conectó ese hecho con el de las órbitas permitidas para un electrón alrededor del núcleo del átomo, en cuya descripción aparece la misma constante de proporcionalidad entre la energía y la frecuencia, que se conoce desde entonces como la constante de Planck.



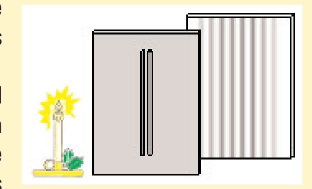



Ondas que pasan por dos agujeros. Según las distancias que recorren, se refuerzan, o se anulan.

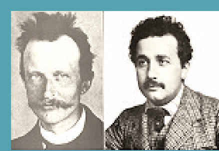
## Interferencia de fotones y de electrones

Thomas Young (1773–1829) realizó en 1801 un experimento muy llamativo, que demostró sin lugar a dudas que la luz es una onda, tema de controversia en su época. Hizo dos ranuras muy cercanas en una pantalla opaca, y las iluminó de un lado. Las destapó una por vez, y del otro lado se proyectaba una mancha de luz sobre una pantalla. Pero cuando destapó las dos ranuras, aparecieron franjas de interferencia claras y oscuras, que obedecen a que la luz recorre caminos ligeramente diferentes. En algunos casos, las dos ondas llegan en fase, y se refuerzan, y en otros llegan con fases opuestas, y se anulan. Algunos puntos de la pantalla que resultaban iluminados por uno solo de los haces, cualquiera, quedaban a oscuras cuando llegaban los dos haces de luz. Así, Young mostró que luz mas luz es igual a oscuridad, cosa que sólo ocurre con las ondas.[11]

El mismo experimento que hizo Young con luz, o fotones, se realizó después con electrones, y con otras partículas, y en todos los casos se obtuvieron franjas de interferencia.



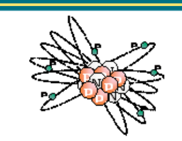
Si se dirige contra la placa perforada una radiación muy débil (por ejemplo, constituida por un fotón por minuto, o un electrón por minuto), el patrón de interferencia se observa igualmente. Ese hecho causó mucha polémica, y aún hoy se discute en ámbitos elementales. Se argumenta: ¿cómo es eso posible? ¿cómo puede un fotón, u otra partícula, que pasó por una de las rendijas, interferir con otra que pasó un rato antes, o que va a pasar un rato después, por la otra? ¿acaso la primera partícula adivina el futuro? La respuesta es que las partículas no pasan por una de los aberturas; *pasan, cada una, por las dos a la vez*. Es que todas las partículas son ondas dispersas.



En una época se llamaba *física clásica* a la física anterior a la teoría de la relatividad; y a la nueva, *física relativista*. Pero como la física cuántica se considera una revolución mayor que la relativista, hoy, por física clásica, se entiende la física anterior a la cuántica, incluya o no la relatividad.
En las fotos, Planck en 1901, y Einstein en 1905.

[11] Algunos científicos contrarios a la teoría ondulatoria tejieron intrigas en contra de Young, y consiguieron que el Parlamento Británico lo expulsara de la Oficina de Longitudes, de la que era Secretario. Sin aclarar la injusticia, lo llamaron más tarde para seguir desempeñando funciones en ese organismo, y Young aceptó.

# Apéndice II. Propiedades de los gases



- Representación de un átomo de carbono 12, adoptado como patrón de masa atómica. (6 n + 6 p + 6 e).
Un mol, o molécula gramo, es una cantidad de $6{,}0221417 \times 10^{23}$ partículas. Es aproximadamente la cantidad de moléculas que hay en dos gramos de hidrógeno molecular (o en un gramo de hidrógeno atómico); en 16 gramos de oxígeno; y, exactamente, la cantidad de átomos que hay en 12 gramos de carbono 12. Un átomo de carbono 12 se compone de seis protones, seis neutrones y seis electrones.



- Programa de *Stark Design* para simular el comportamiento de los gases. A temperaturas elevadas (bolitas veloces), las moléculas chocan, y se separan. Al disminuir la temperatura, quedan adheridas; el gas condensa, y cristaliza.

El término gas proviene del griego, χαοσ (*khaos*, o *jaos*), el caos, o desorden, por oposición a κοσμοσ, el cosmos, u orden. La palabra la inventó Jean-Baptiste van Helmont (1577–1644) en el siglo XVII, para designar cuerpos que hasta ese momento se llamaban aires, o espíritus.[12] Hoy se sabe que un gas es un conjunto de partículas, o moléculas, separadas entre sí por espacio vacío. Las moléculas se encuentran en movimiento de rotación, vibración y traslación, y rebotan entre ellas, contra las paredes del recipiente en que esté contenido el gas, y contra cualquier otro cuerpo sólido o líquido que encuentren en su camino. El efecto de esos choques es la presión del gas. Y el movimiento de traslación de las moléculas, se corresponde con la temperatura.[13]

| Gases del aire | Concentración (%) |
|---|---|
| Nitrógeno ($N_2$) | 78,084 |
| Oxígeno ($O_2$) | 20,946 |
| Argón (Ar) | 0,934 |
| Vapor de agua ($H_2O$) | 0,4 |
| Dióxido de carbono ($CO_2$) | 0,033 |
| Neón (Ne) | 0,001818 |
| Helio (He) | 0,000524 |
| Metano ($CH_4$) | 0,0001745 |
| Criptón (Kr) | 0,000114 |
| Hidrógeno (H) | 0,000055 |
| Óxido Nitroso ($N_2O$) | 0,00005 |
| Xenón (Xe) | $9 \times 10^{-6}$ |
| Ozono ($O_3$) | $7 \times 10^{-6}$ |
| Óxido de Nitrógeno ($NO_2$) | $2 \times 10^{-6}$ |
| Yodo (I) | $1 \times 10^{-6}$ |
| Monóxido de carbono (CO) | trazas |
| Amoniaco ($NH_3$) | trazas |

Por ejemplo, el aire que respiramos es una mezcla de gases, como indica la tabla. El que más abunda es el nitrógeno, con $2{,}15 \times 10^{22}$ moléculas por litro, distantes entre sí unos 3,6 nanómetros, equivalentes a unos diez diámetros moleculares. Sus velocidades promedian los 500 metros por segundo. Las moléculas se atraen entre sí, y se ejercen mutuamente otros diversos tipos de interacciones. Cuando la temperatura del gas es elevada, la energía cinética de traslación de sus moléculas es grande, y la atracción molecular apenas se manifiesta. En cambio, a temperaturas más bajas, las velocidades de las moléculas son comparativamente pequeñas, y entra en acción la atracción entre ellas, hasta que el gas se convierte en líquido, o en sólido.

Por ejemplo, si enfriamos aire, lo primero que se observa es que el gas de agua presente se convierte en líquido: los vidrios y superficies lisas se empañan. Si el enfriamiento prosigue, se

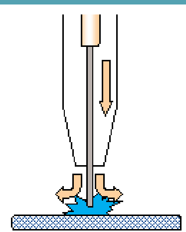
[12] Todavía se les dice *bebidas espirituosas* a las de alta graduación (precisamente porque despiden gases alcohólicos); también se le decía *espíritu de petróleo* al éter, y *espíritu de sal* al ácido clorhídrico.

[13] En un gas monoatómico (esto es, compuesto por moléculas de un solo átomo cada una) la temperatura del gas se relaciona con la energía cinética media de sus moléculas ($E_C = ½\, m.v^2$), mediante la fórmula $E_C = k.T$, donde $T$ es la temperatura absoluta, en kelvin, y $k$ es la constante de Boltzmann, $1{,}3806504 \times 10^{-23}$ J.K$^{-1}$.mol$^{-1}$, o bien 0,08205746 l.at K$^{-1}$.mol$^{-1}$ (litro atmósfera sobre kelvin mol).

condensan también, en forma de líquido, los demás gases del aire. Para mencionar sólo los más abundantes, el que se condensa a una temperatura mayor es el dióxido de carbono, o hielo seco, a los –57 °C; si-gue el nitrógeno, a –196 °C; el argón, a –185,7 °C; el oxígeno, a –183 °C; el neón, a –246,09 °C, y el helio, a –268,94 °C.

Para separar esos diversos gases, y aprovecharlos con fines industriales y medicinales, se comprime el aire a unas 200 atmósferas. Al hacerlo, aumenta su temperatura, como lo comprobamos al accionar un inflador de bicicleta. Cuando se lo deja enfriar, el aire, que era gaseoso, se licua; y en el momento de abrir el recipiente, se evapora lentamente y permanece líquido, mientras su temperatura disminuye hasta estabilizarse en 196 grados bajo cero, que mantiene mientras quede nitrógeno.

En ese estado se lo puede guardar durante muchas horas en un termo cuyo tapón tenga una pequeña abertura, para que no estalle.[14] El nitrógeno se evapora antes que el oxígeno, porque hierve a una temperatura menor.[15]



El argón, que integra cerca del uno por ciento del aire, no reacciona químicamente; por eso se lo emplea para generar una atmósfera inerte en la unión de piezas que, si se las soldara al aire, se oxidarían, o se combinarían con el nitrógeno, con pérdida de propiedades útiles. En el esquema, un electrodo de tungsteno, que suelda por arco eléctrico, rodeado de un tubo que sopla argón.

## Gas ideal y gas de Van der Waals

Se llama *gas ideal* un gas cuyas moléculas se suponen de tamaño nulo; por tanto sólo chocan contra las paredes del recipiente, y no entre ellas; y además, las moléculas no se ejercen fuerzas entre sí. Cuando la temperatura es bastante alta, o la presión suficientemente baja, los gases verdaderos se comportan aproximadamente como un gas ideal. El aire, por ejemplo, a presiones y temperaturas no muy alejadas de las normales, se aparta un dos o tres por ciento del comportamiento ideal. En los cursos elementales se le da mucha importancia a este concepto, porque permite la ejercitación con fórmulas sencillas; pero en ambientes tecnológicos se prefiere el trabajo con fórmulas más complejas, y apropiadas para los casos reales; por ejemplo las del *gas de Van der Waals*, que tiene presente tanto el tamaño de las moléculas, como las fuerzas que se ejercen.

$$pV = nRT \qquad\qquad (p + \frac{a}{v^2})(v - b) = RT$$

A la izquierda, la ecuación de estado de un gas ideal, a la derecha, la de un gas de Van der Waals, que describe los gases reales más acertadamente la ecuación para los gases ideales.

R es la constante universal de los gases, $8{,}3149 \times 10^3$ J/(kg.K.mol); $v = M/\rho$ (cociente de la masa molecular en unidades atómicas, y la densidad, rho, respectivamente) es el volumen específico molar en $m^3$/(kg.mol); *p* es la presión en pascales; *T*, la temperatura en kelvin; *a* y *b* son constantes diferentes para cada gas, ambas nulas para un gas ideal. La constante *a* del oxígeno vale 138 $n.m^4/(kg.mol)^2$; la del agua, 580 $n.m^4/(kg.mol)^2$; la constante *b* para los mismos gases vale 0,0318 y 0,0319 $m^3$/(kg.mol), respectivamente. La cantidad *n* es el número de moléculas kilogramo, o mil veces el número de moles del gas.

Cualquiera de las dos fórmulas anteriores, con diferente precisión, nos dicen que si se comprime un gas, y se mantiene su temperatura, la presión aumenta.[16]



Encendedor neolítico, en una versión mejorada del que se usaba hace diez mil años. Se coloca una viruta en el extremo del pistón, se lo introduce en el mortero, y se comprime el aire atrapado con un golpe de puño. Tal como ocurre en un motor gasolero, el combustible se inflama con la temperatura alcanzada durante la compresión. Sale una brasa, que, soplada junto con otras, encienden por fin una llama.

## Compresión adiabática

*Adiabática* significa que durante esa compresión, el gas no intercambia calor con el am-

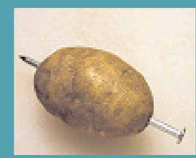
[14] Si se pone un poco de aire líquido en una botella de bebida gaseosa, y se la cierra con su tapa, al cabo de uno o dos minutos la botella estalla ruidosamente. El experimento es peligroso, y se recomienda no hacerlo; se lo menciona aquí justamente para señalar el riesgo de cerrar herméticamente un termo que contenga aire líquido.

[15] Cuando se utiliza nitrógeno líquido, no hay que confiar en que sea siempre una sustancia inerte; podría condensar el oxígeno del ambiente, que es muy oxidante, y hasta explosivo, si entra en contacto con una brasa.

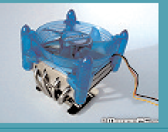
[16] Si se impide que el gas, mientras se lo comprime, ceda calor al ambiente (con un recipiente aislado térmicamente), la temperatura del gas aumenta.



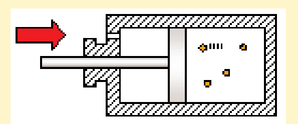
La circulación atmosférica se produce por convección natural. En la figura, un modelo simplificado de Euskalmet (Agencia Vasca de Meteorología). El aire se calienta en el ecuador, y asciende; y se enfría en los polos, donde desciende.



Los tubos de calor se usan en panaderías, para conducir el calor desde el quemador del horno hacia todos lados. También se empleaban unos de pequeño tamaño, para clavarlos en los trozos gruesos de carne, en reemplazo de los clavos de plata que se usaban hace siglos, para que, durante el horneado, la cocción llegase al interior. Esa técnica se abandonó por los hornos de microondas. Arriba, clavo sólido de conducción *Spud Spikes*, para asar carne, o papas. Abajo, un enfriador para procesador de computadora, con cuatro tubos de calor. El aparato es más pequeño y silencioso que los de convección simple.



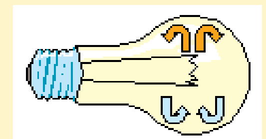
biente. El resultado es una elevación de la temperatura del gas, que puede alcanzar miles de grados, como ocurre con el aire embestido y comprimido por la nariz de una nave espacial, cuando regresa a la atmósfera. Una manera de comprender el por qué de ese efecto, es imaginar, como muestra la figura, un pistón que empuja las moléculas de un gas. Cuando éstas rebotan contra la superficie móvil, adquieren una velocidad mayor que la que tenían antes del choque, y eso ocurre, mientras el pistón avanza, miles de veces por segundo, de modo que la velocidad de las moléculas aumenta considerablemente. Y mayor velocidad de traslación de las partículas, significa una mayor temperatura del gas.



## TRANSMISIÓN DEL CALOR POR CONVECCIÓN

En el funcionamiento de equipos eléctricos y electrónicos de cierto tamaño en adelante, por ejemplo el de una computadora, la disipación del calor se convierte en un problema importante, y de difícil solución. Normalmente la refrigeración se produce por radiación (véase el Apéndice I) y por convección. La convección es el movimiento del aire, u otro gas, o de un líquido. Se distinguen dos casos: la natural, y la forzada. La convección natural se produce cuando una cierta masa de aire caliente aumenta su volumen como consecuencia de su calentamiento; entonces disminuye su densidad; flota en el aire más frío circundante, y asciende. Percibimos ese efecto al tocar una lámpara incandescente que estuvo encendida durante algunos segundos; la parte superior se calienta más que la inferior, por el movimiento del gas que hay en su interior.[17]

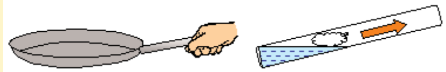
Por lo dicho, una lámpara con su zócalo hacia abajo disipa el calor mejor que cuando cuelga, que es, por desdicha, el caso más común. La convección forzada es la que utiliza la energía de un ventilador. Casi todas las computadoras actuales se refrigeran por ese método, con el inconveniente de que el ruido de los ventiladores, o el de la turbulencia del aire en circulación incomodan en algunos casos.



## TUBOS DE CALOR

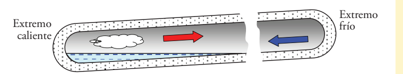
Una propiedad muy útil de aquellos gases cuyo comportamiento se aparta mucho del ideal –esto es, los gases que se condensan a temperaturas elevadas, o no muy bajas– es la construcción de *tubos de calor*.

Alguna vez, al tomar con la mano el mango de caño de una sartén sobre el fuego, notamos que el mango quemaba, por haber quedado en el hueco un poco de agua del último lavado. El extremo del mango en contacto con la sartén se calienta, el agua alojada en el caño hierve, y el vapor de agua transmite el calor por convección hacia el extremo alejado, con mucha mayor eficiencia que la conducción térmica del caño.



Un tubo de calor suele ser de acero inoxidable, u otro metal resistente a la oxidación, y a temperaturas elevadas. En su interior tiene una sustancia que, a la presión interna, es líquida cuando se encuentra a la temperatura del extremo frío del tubo, y gaseosa cuando está a la temperatura del extremo caliente.

El interior del tubo se tapiza de un material esponjoso, que conviene que sea cerámico, cuando el tubo opera a varios cientos de grados. Cuando el líquido se evapora en el extremo caliente; sus vapores avanzan hacia el extremo frío, allí se condensan, y el líquido regresa por el material poroso, a veces cuesta arriba si es muy absorbente.




Esos tubos conducen el calor con una eficiencia centenares de veces mayor que una barra maciza de cualquier material.

[17] Las antiguas lámparas incandescentes al vacío, en cambio, no presentaban ese efecto. Tenían más rendimiento, porque perdían menos calor, pero el filamento se evaporaba antes que el de las actuales, y por eso duraban menos.

# Apéndice III. Corrientes en gases y en el vacío

A pesar de que a mediados del siglo XX prácticamente finalizó la era de las válvulas de vacío y de gas, es igualmente útil conocer los rudimentos de la conducción eléctrica en ambos medios, ya que, por ejemplo, aún conviven los antiguos monitores y tubos de TV de rayos catódicos al vacío, con las más recientes pantallas de plasma;[18] y hay además muchas aplicaciones eléctricas y electrónicas en las que se tiene en cuenta la conducción en esos medios.

## Conducción en el vacío

El vacío, de conductividad idealmente nula, es el espacio libre de materia. Sin embargo, si la distancia entre dos electrodos al vacío es suficientemente pequeña, y la tensión bastante elevada; o si la temperatura del electrodo negativo es suficiente, se desprenden electrones del cátodo, que el ánodo captura, y se origina así una corriente eléctrica. En cambio, para tensiones pequeñas, distancias suficientes, y electrodos fríos, el vacío resulta aislante.

Los mismos parámetros (distancia, tensión y temperatura) determinan la condición de aislante o conductor de un gas.

## Conducción en gases

A diferencia de muchos sólidos y líquidos, en los que hay presentes electrones libres en las redes cristalinas, los gases, cuando están sin ionizar, son aislantes. Pero en condiciones especiales, los gases se ionizan, y se vuelven muy conductores de la electricidad.[19]

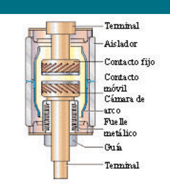
La ionización de un gas puede obedecer a su elevada temperatura,[20] o a una intensidad suficiente del campo eléctrico. Por ejemplo, con las tensiones de centenares de millones de voltios de las tormentas eléctricas, el aire atmosférico se vuelve conductor, en cientos de metros, y al nivel del suelo. Lo mismo ocurre, en una distancia mucho menor, con el chispero eléctrico de un encendedor.

Una vez iniciada la conducción, los electrones se aceleran en el campo eléctrico, chocan contra los átomos que encuentran en su camino, y los ionizan a su vez, con lo que aparecen más electrones libres. Los iones positivos, por su parte se aceleran en sentido opuesto, y también

[18] Recordemos que un plasma es un gas altamente ionizado. Los capítulos 2, 3, 4 y 10 hacen referencia a las aplicaciones de ese cuarto estado de la materia.

[19] Cuando el fuego alcanza los contactos de un enchufe de baja tensión, se establece, a través de la llama, un camino conductor entre vivo y neutro, o entre el vivo y partes a tierra cercanas, y se agrava el incendio. Por eso, a veces no se sabe si un incendio se originó en un cortocircuito, o si ocurrió lo inverso.

[20] El capítulo 16 menciona los efectos que tiene en las comunicaciones, la incandescencia del escudo térmico de las naves espaciales que regresan a la atmósfera.




Polo, u órgano de conexión y desconexión, de un interruptor de vacío de 24 kV. El contacto móvil se puede desplazar un centímetro, gracias a un fuelle metálico flexible. La chispa, o arco eléctrico, volatiliza parte del metal. Cuando los gases metálicos se condensan sobre las paredes frías, mejoran el vacío reinante. Esos polos ocupan menos sitio que los contactos inmersos en gas hexafluoruro de azufre, aceite o aire.



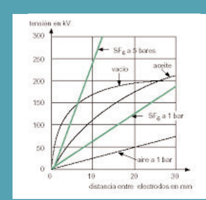
En ciertas condiciones, el aire es conductor de la electricidad. Arriba, arco eléctrico accidental, de 500 kV y dos metros, en un seccionador en aire. *(Foto: Jim Phillips)*. Abajo, arco de 5 kV y medio centímetro, en un encendedor. *(Dibujo: Kyocera Corp.)*



chocan, y ionizan átomos. Los iones y electrones, cuando pierden energía después de varios choques, se combinan con partículas de la polaridad opuesta, y quedan momentáneamente fuera del fenómeno de la circulación de corriente; hasta que otros iones choquen con los átomos que se acaban de formar, y los ionicen.

Los aspectos cuantitativos de esos fenómenos dependen del tipo de gas, la intensidad del campo eléctrico, la distancia a la que se encuentre un átomo de otro, o una molécula de otra, y sus velocidades; en otras palabras, la conducción depende del campo eléctrico, de la presión,[21] y de la temperatura.

Si la densidad del gas es muy baja, la probabilidad de que una partícula choque con otra se reduce, y un ion puede atravesar la distancia completa entre electrodos, sin que se produzca una ionización adicional. Por otra parte, si la densidad es muy elevada, las partículas chocan muy frecuentemente, sin tiempo de tomar velocidad suficiente como para ionizar átomos. Para cada separación entre electrodos hay una densidad intermedia, en la que el efecto de ionización por choque es máximo.




- Comportamiento del vacío, del aire, el hexafluoruro de azufre (un gas) y el aceite dieléctrico. Cuanto mayor es la distancia entre electrodos, más elevada es la tensión que pueden soportar a la temperatura ambiente. Un bar es, aproximadamente, una atmósfera de presión. (Gráfico de Schneider Electric.)

## Ley de Paschen

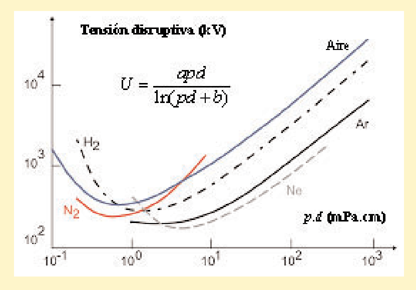
Friedrich Paschen (1865–1947) publicó los resultados de muchos experimentos de descargas eléctricas, en gases a diferentes presiones, y propuso varias fórmulas empíricas.[22] Una de esas fórmulas, válida para una separación de los electrodos del orden de un milímetro, establece que la tensión eléctrica disruptiva (la que produce la conducción del gas) depende de la presión mediante la fórmula $U = 30.p.d + 1.350$ V.

*U* es la tensión, en voltios; *p* es la presión, en torr, o milímetros de mercurio; y *d*, la separación entre electrodos, en centímetros. Por ejemplo, para un milímetro de separación, y una presión normal de 760 torr, y para que salte una chispa eléctrica entre los dos electrodos, hay que aplicar una tensión de valor $30 \times 760 \times 0{,}1 + 1.350$, unos 3.600 volt de cesta, o 3.200 eficaces.



- Los tubos y lámparas compactas fluorescentes, por la gran separación entre sus electrodos, necesitan tensiones bastante mayores que los 220 V eficaces, o 315 de cresta, de la línea eléctrica domiciliaria. Sus circuitos generan una tensión de arranque mayor, de varios centenares de voltios. En cambio, una pequeña lámpara de neón enciende con la mera tensión de la red. (El resistor de 100 kΩ limita la corriente, dado que los gases disminuyen su resistividad con la temperatura.)

Posteriormente, otros investigadores propusieron expresiones más complejas, pero que se pueden aplicar a separaciones entre electrodos más variadas. En la fórmula de la figura, las constantes *a* y *b* son propias de cada gas (las del aire valen 43,6 y 12,8); *p* es la presión, en atmósferas, y *d* es la separación entre electrodos planos o redondeados, en metros.




Las escalas logarítmicas de los ejes facilitan la representación de magnitudes de muy diverso orden. Se aprecia que el neón es el gas más fácil de encender, entre los que menciona el gráfico.[23]

## Tubos de Crookes

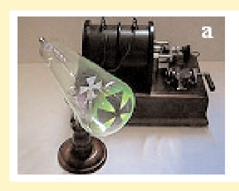
Como curiosidad histórica, mencionamos algunos de los experimentos científicos más antiguos[24] que se conocen de descargas en el vacío y en gases, realizados por William Crookes

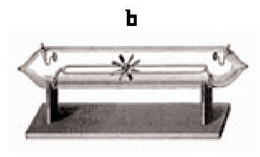
[22] *Empírico* significa concerniente o relativo a la experiencia. Se aplica, en este caso, y en otros, a los conocimientos que se obtienen de la observación directa, y sin una teoría de interpretación.

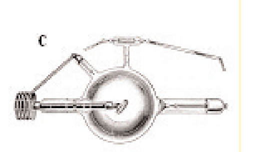
[23] Se fabrican lámparas de neón encienden con 90 V, y con algo menos. La presión del gas en el interior de la ampolla es de algunas milésimas de atmósfera.

[24] Hay conjeturas sobre la posibilidad de experimentos anteriores, pero no eran científicos, sino prácticas de fin desconocido, quizá religioso. El vacío, o disminución de presión, se conseguía con columnas de agua cerradas por arriba, que se vaciaban sobre un recipiente, y la tensión eléctrica se generaba por fricción de cintas. (Consúltese, por ejemplo, el capítulo Reyes 2 de la Biblia.)

(1832–1919), antes de que se conociera la estructura atómica. Crookes usaba, como fuente de alta tensión, un transformador cuyo primario alimentaba con una corriente alterna de onda cuadrada; que conseguía con una batería de corriente continua entrecortada con un electroimán.










**a-**Tubo de rayos catódicos. La alta tensión aplicada entre dos electrodos, arranca electrones del cátodo, y los proyecta contra la pintura fluorescente del frente, que brilla. La cruz de Malta hace sombra, y muestra que los electrones viajan en línea recta. **b-**La corriente de electrones y de iones que circula entre los electrodos del tubo, hace girar una noria. **c-**Tubo de rayos X. Los electrones que salen del cátodo, a la derecha, chocan con el anticátodo, a la izquierda; y, por el frenado brusco, emiten rayos X. Arriba, un ánodo auxiliar dirige el haz de electrones; y una entrada lenta de aire, permite que el tubo funcione con una tensión más baja. **d-**Radiómetro, o molinillo de radiación, hecho con aspas negras de un lado, y blancas del otro. Cuando la parte blanca refleja la luz, recibe del rayo luminoso un impulso mayor que el aspa opuesta, pintada de negro; entonces, cuando se ilumina el aparato, las paletas giran, teóricamente, con lo negro hacia adelante.[25]

## Otras fuentes de estudio

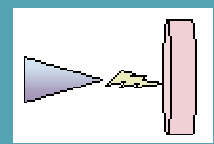

• **Paul F. Schurmann**, *Historia de la Física*, Nova, Buenos Aires, 1946. Ese libro resume 25 siglos de ciencia a través de las ideas centrales y la biografía de sus investigadores e investigadoras. Está disponible para consulta en cuatro bibliotecas de Buenos Aires.

• **Danni AyalaHinojosa**, *Composición de la atmósfera terrestre*, http://www.ecuadorciencia.org/articulos.asp?id=5677

• **Universidad Tecnológica Metropolitana del Estado de Chile**, *Apuntes de físicoquímica*, http://www.ingenieriaquimica.net/recursos/descarga.php?id=148&accion=descargar

• **Georges Bernard** (Trad. castellana de E. Milà, 2000), Schneider Electric, *La ruptura por auto expansión*, Cuaderno técnico 171, Buenos Aires. (Edición francesa, 1993). Da detalles técnicos sobre las propiedades de los gases en la extinción del arco eléctrico en interruptores. http://www.ingeborda.com.ar/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Catalogos%20de%20Fabricantes/Materiales%20Electricos/Schneider/Cuadernos%20Tecnicos%20CT/CT171.pdf

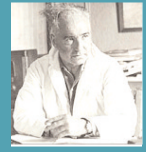
• **Giordano J. L.**, 2007 *Cómo funcionan las cosas: La esfera de plasma* (Santiago: http://www.profísica.cl) Contiene datos técnicos y fotos sobre el funcionamiento de una bola de plasma, y algunos experimentos que se pueden hacer con ella, y con lámparas fluorescentes compactas, o de bajo consumo, aun cuando estén agotadas.
http://www.profisica.cl/comofuncionan/como.php?id=39 (Consulta: Julio 13, 2009)

La tensión de descarga depende de la forma de los electrodos. Cuando el negativo termina en punta y el positivo es plano, la tensión es mayor que en el caso opuesto.



Crookes fue un científico serio y de renombre, y sus llamativos experimentos trascendieron el círculo de especialistas. Una vez sugirió la posible existencia de un campo de fuerzas psíquico, lo que alentó muy atrevidas especulaciones; las de Wilhelm Reich (1897–1957) entre ellas, quien afirmó la existencia de cuantos de deseo, que llamó *orgones*. Intentó amplificarlos con unas *cajas orgónicas*. La superficialidad y charlatanería se presentan como consuelos de todos los tiempos para la ignorancia. Toda sociedad provee, también hoy, muchos ejemplos.
Abajo, Reich.



[25] Cuando queda un poco de aire dentro del radiómetro, funciona mejor que con buen vacío, y lo hace en sentido inverso al dicho. Eso se debe a la agitación térmica de las moléculas del aire residual en el tubo, mayor en las proximidades de las superficies negras, que alcanzan una temperatura mayor que las superficies blancas.